

Брайан Грин • THE FABRIC OF THE COSMOS, Space, Time, and the Texture of Reality

БРАЙАН ГРИН

доктор «Экспертный Проект»
представляет

ТКАНЬ КОСМОСА

ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ
И
ТЕКСТУРА
РЕАЛЬНОСТИ



Annotation

Брайан Грин — один из ведущих физиков современности, автор «Элегантной Вселенной» — приглашает нас в очередное удивительное путешествие вглубь мироздания, которое поможет нам взглянуть в совершенно ином ракурсе на окружающую нас действительность.

В книге рассматриваются фундаментальные вопросы, касающиеся классической физики, квантовой механики и космологии. Что есть пространство? Почему время имеет направление? Возможно ли путешествие в прошлое? Какую роль играют симметрия и энтропия в эволюции космоса? Что скрывается за тёмной материей? Может ли Вселенная существовать без пространства и времени?

Грин детально рассматривает картину мира Ньютона, идеи Маха, теорию относительности Эйнштейна и анализирует её противоречия с квантовой механикой. В книге обсуждаются проблемы декогеренции и телепортации в квантовой механике. Анализируются многие моменты инфляционной модели Вселенной, первые доли секунды после Большого взрыва, проблема горизонта, образование галактик. Большое внимание уделено новому современному подходу к объяснению картины мира с помощью теории струн/М-теории.

Грин показывает, что наш мир сильно отличается от того, к чему нас приучил здравый смысл. Автор увлекает всех нас, невзирая на уровень образования и научной подготовки, в познавательное путешествие к новым пластам реальности, которые современная физика вскрывает под слоем привычного нам мира.

-
- [Брайан Грин](#)
 - [Предисловие](#)
 - [Часть I. Арена реальности](#)
 - [Глава 1. Пути к реальности](#)
 -
 - [Классическая реальность](#)
 - [Релятивистская реальность](#)
 - [Квантовая реальность](#)
 - [Космологическая реальность](#)
 - [Объединённая реальность](#)
 - [Реальность прошлого и будущего](#)

- [Возмужание в пространстве и времени](#)
- [Глава 2. Вселенная и ведро](#)
 -
 - [Относительность до Эйнштейна](#)
 - [Ведро](#)
 - [Трудности с пространством](#)
 - [Мах и смысл пространства](#)
 - [Мах, движение и звёзды](#)
 - [Мах против Ньютона](#)
- [Глава 3. Относительность и абсолют](#)
 -
 - [Пусто ли пустое пространство?](#)
 - [Относительное пространство, относительное время](#)
 - [Изопрён, но не злонамерен](#)
 - [А как насчёт ведра?](#)
 - [Нарезая пространство и время](#)
 - [Срезы под разными углами](#)
 - [Ведро с точки зрения специальной теории относительности](#)
 - [Гравитация и старинный вопрос](#)
 - [Эквивалентность гравитации и ускорения](#)
 - [Искривления, рябь и гравитация](#)
 - [Общая теория относительности и ведро](#)
 - [Пространство-время в третьем тысячелетии](#)
- [Глава 4. Запутывание пространства](#)
 -
 - [Мир согласно квантовым представлениям](#)
 - [Красное и синее](#)
 - [Посылая волны](#)
 - [Вероятность и законы физики](#)
 - [Эйнштейн и квантовая механика](#)
 - [Гейзенберг и принцип неопределённости](#)
 - [Эйнштейн, неопределённость и вопрос реальности](#)
 - [Квантовый отклик](#)
 - [Белл и спин](#)
 - [Тестирование реальности](#)
 - [Подсчёт ангелов на игле](#)
 - [Нет дыма без огня](#)
 - [Запутанность и специальная теория относительности:](#)

- [стандартный подход](#)
 - [Запутанность и специальная теория относительности: альтернативный подход](#)
 - [Что нам со всем этим делать?](#)
- [Часть II. Время и опыт](#)
 - [Глава 5. Замёрзшая река](#)
 - [Течёт ли время?](#)
 - [Устойчивая иллюзия прошлого, настоящего и будущего](#)
 - [Опыт и течение времени](#)
 - [Глава 6. Случайность и стрела времени](#)
 - [Загадка](#)
 - [Прошлое, будущее и фундаментальные законы физики](#)
 - [Симметрия по отношению к обращению времени](#)
 - [Теннисные мячи и разбивающиеся яйца](#)
 - [Принцип и практика](#)
 - [Энтропия](#)
 - [Энтропия, второй закон и стрела времени](#)
 - [Энтропия: прошлое и будущее](#)
 - [Следуя за математикой](#)
 - [Затруднительное положение](#)
 - [Делая шаг назад](#)
 - [Яйцо, курица и Большой взрыв](#)
 - [Энтропия и гравитация](#)
 - [Важное утверждение](#)
 - [Последняя загадка](#)
 - [Глава 7. Время и кванты](#)
 - [Прошлое согласно квантовой теории](#)
 - [В страну Оз](#)
 - [Свобода выбора](#)
 - [Усечение истории](#)
 - [Случайность истории](#)
 - [Стирая прошлое](#)
 - [Формируя прошлое\[46\]](#)
 - [Квантовая механика и опыт](#)
 - [Загадка квантового измерения](#)
 - [Реальность и проблема квантового измерения](#)

- [Декогеренция и квантовая реальность](#)
 - [Квантовая механика и стрела времени](#)
- [Часть III. Пространство-время и космология](#)
 - [Глава 8. О снежинках и пространстве-времени](#)
 -
 - [Симметрия и законы физики](#)
 - [Симметрия и время](#)
 - [Растяжение ткани](#)
 - [Время в расширяющейся Вселенной](#)
 - [Тонкие особенности расширяющейся Вселенной](#)
 - [Космология, симметрия и форма пространства](#)
 - [Космология и пространство-время](#)
 - [Альтернативные формы](#)
 - [Космология и симметрия](#)
 - [Глава 9. Испарение вакуума](#)
 -
 - [Теплота и симметрия](#)
 - [Сила, материя и поля Хиггса](#)
 - [Поля в охлаждающейся Вселенной](#)
 - [Океан Хиггса и происхождение массы](#)
 - [Объединение в охлаждающейся Вселенной](#)
 - [Великое объединение](#)
 - [Возвращение эфира](#)
 - [Энтропия и время](#)
 - [Глава 10. Препарирование взрыва](#)
 -
 - [Эйнштейн и отталкивающая гравитация](#)
 - [О прыгающих лягушках и переохлаждении](#)
 - [Инфляция](#)
 - [Рамки инфляции](#)
 - [Инфляция и проблема горизонта](#)
 - [Инфляция и проблема плоскостности](#)
 - [Прогресс и предсказания](#)
 - [Предсказание темноты](#)
 - [Убегающая Вселенная](#)
 - [Пропавшие 70%](#)
 - [Загадки и прогресс](#)
 - [Глава 11. Кванты на небе в алмазах](#)
 -

- [Квантовый скайрайтинг\[66\]](#)
- [Золотой век космологии](#)
- [Создание Вселенной](#)
- [Инфляция, гладкость и стрела времени](#)
- [Энтропия и инфляция](#)
- [Больцман возвращается](#)
- [Инфляция и яйцо](#)
- [Ложка дёгтя в бочке мёда?](#)
- [Часть IV. Истоки и объединение](#)
 - [Глава 12. Мир на струне](#)
 -
 - [Квантовая дрожь и пустое пространство](#)
 - [Проблемы с квантовыми флуктуациями{158}](#)
 - [Нужно ли это?](#)
 - [Невероятный путь к решению\[74\]](#)
 - [Первая революция](#)
 - [Теория струн и объединение](#)
 - [Почему работает теория струн?](#)
 - [Ткань космоса в области малого](#)
 - [Более тонкие вопросы](#)
 - [Свойства частиц в теории струн](#)
 - [Слишком много колебаний](#)
 - [Объединение в высших измерениях](#)
 - [Скрытые измерения](#)
 - [Теория струн и скрытые измерения](#)
 - [Форма скрытых измерений](#)
 - [Физика струн и дополнительные измерения](#)
 - [Ткань космоса согласно теории струн](#)
 - [Глава 13. Вселенная на бране](#)
 -
 - [Вторая суперструнная революция](#)
 - [Мощь перевода](#)
 - [Одиннадцать измерений](#)
 - [Браны](#)
 - [Миры на бранах](#)
 - [Липкие браны и колеблющиеся струны](#)
 - [Наша Вселенная как брана](#)
 - [Гравитация и большие дополнительные измерения](#)
 - [Большие дополнительные измерения и большие струны](#)

- [Теория струн сопротивляется экспериментальной проверке?](#)
- [Космология мира на бране](#)
- [Циклическая космология](#)
- [Беглая оценка](#)
- [Новый взгляд на пространство и время](#)
- [Часть V. Реальность и воображение](#)
 - [Глава 14. Вверх в небеса и вниз на землю](#)
 - [Эйнштейновское увлечение](#)
 - [Ловля волны](#)
 - [Поиск дополнительных измерений](#)
 - [Океан Хиггса, суперсимметрия и теория струн](#)
 - [Космические истоки](#)
 - [Тёмная материя, тёмная энергия и будущее Вселенной](#)
 - [Пространство, время и предположения теории](#)
 - [Глава 15. Телепортация и машины времени](#)
 - [Телепортация в квантовом мире](#)
 - [Квантовое запутывание и квантовая телепортация](#)
 - [Практическая телепортация](#)
 - [Загадки путешествия во времени](#)
 - [Пересмотр загадок](#)
 - [Свободная воля, множество миров и путешествие во времени](#)
 - [Возможно ли путешествие в прошлое?](#)
 - [Проект машины времени на основе кротовой норы](#)
 - [Построение машины времени на кротовой норе](#)
 - [Толпы зевак из будущего](#)
 - [Глава 16. Будущее одной иллюзии](#)
 - [Фундаментальны ли понятия пространства и времени?](#)
 - [Квантовое усреднение](#)
 - [Преобразование геометрии](#)
 - [На что указывает энтропия чёрной дыры?](#)
 - [Является ли Вселенная голограммой?](#)
 - [Составляющие пространства-времени](#)
 - [Внутреннее и внешнее пространство](#)
- [Словарь научных терминов](#)

- [Литература для дальнейшего чтения](#)
- [notes](#)
 - [1](#)
 - [2](#)
 - [3](#)
 - [4](#)
 - [5](#)
 - [6](#)
 - [7](#)
 - [8](#)
 - [9](#)
 - [10](#)
 - [11](#)
 - [12](#)
 - [13](#)
 - [14](#)
 - [15](#)
 - [16](#)
 - [17](#)
 - [18](#)
 - [19](#)
 - [20](#)
 - [21](#)
 - [22](#)
 - [23](#)
 - [24](#)
 - [25](#)
 - [26](#)
 - [27](#)
 - [28](#)
 - [29](#)
 - [30](#)
 - [31](#)
 - [32](#)
 - [33](#)
 - [34](#)
 - [35](#)
 - [36](#)
 - [37](#)

- [38](#)
- [39](#)
- [40](#)
- [41](#)
- [42](#)
- [43](#)
- [44](#)
- [45](#)
- [46](#)
- [47](#)
- [48](#)
- [49](#)
- [50](#)
- [51](#)
- [52](#)
- [53](#)
- [54](#)
- [55](#)
- [56](#)
- [57](#)
- [58](#)
- [59](#)
- [60](#)
- [61](#)
- [62](#)
- [63](#)
- [64](#)
- [65](#)
- [66](#)
- [67](#)
- [68](#)
- [69](#)
- [70](#)
- [71](#)
- [72](#)
- [73](#)
- [74](#)
- [75](#)
- [76](#)

- [77](#)
- [78](#)
- [79](#)
- [80](#)
- [81](#)
- [82](#)
- [83](#)
- [84](#)
- [85](#)
- [86](#)
- [87](#)
- [88](#)
- [89](#)
- [90](#)
- [91](#)
- [92](#)
- [93](#)
- [94](#)
- [95](#)
- [96](#)
- [97](#)
- [98](#)
- [99](#)
- [100](#)
- [101](#)
- [102](#)
- [103](#)

- [comments](#)

- [1](#)
- [2](#)
- [3](#)
- [4](#)
- [5](#)
- [6](#)
- [7](#)
- [8](#)
- [9](#)
- [10](#)
- [11](#)

- [12](#)
- [13](#)
- [14](#)
- [15](#)
- [16](#)
- [17](#)
- [18](#)
- [19](#)
- [20](#)
- [21](#)
- [22](#)
- [23](#)
- [24](#)
- [25](#)
- [26](#)
- [27](#)
- [28](#)
- [29](#)
- [30](#)
- [31](#)
- [32](#)
- [33](#)
- [34](#)
- [35](#)
- [36](#)
- [37](#)
- [38](#)
- [39](#)
- [40](#)
- [41](#)
- [42](#)
- [43](#)
- [44](#)
- [45](#)
- [46](#)
- [47](#)
- [48](#)
- [49](#)
- [50](#)

- [51](#)
- [52](#)
- [53](#)
- [54](#)
- [55](#)
- [56](#)
- [57](#)
- [58](#)
- [59](#)
- [60](#)
- [61](#)
- [62](#)
- [63](#)
- [64](#)
- [65](#)
- [66](#)
- [67](#)
- [68](#)
- [69](#)
- [70](#)
- [71](#)
- [72](#)
- [73](#)
- [74](#)
- [75](#)
- [76](#)
- [77](#)
- [78](#)
- [79](#)
- [80](#)
- [81](#)
- [82](#)
- [83](#)
- [84](#)
- [85](#)
- [86](#)
- [87](#)
- [88](#)
- [89](#)

- [90](#)
- [91](#)
- [92](#)
- [93](#)
- [94](#)
- [95](#)
- [96](#)
- [97](#)
- [98](#)
- [99](#)
- [100](#)
- [101](#)
- [102](#)
- [103](#)
- [104](#)
- [105](#)
- [106](#)
- [107](#)
- [108](#)
- [109](#)
- [110](#)
- [111](#)
- [112](#)
- [113](#)
- [114](#)
- [115](#)
- [116](#)
- [117](#)
- [118](#)
- [119](#)
- [120](#)
- [121](#)
- [122](#)
- [123](#)
- [124](#)
- [125](#)
- [126](#)
- [127](#)
- [128](#)

- [129](#)
- [130](#)
- [131](#)
- [132](#)
- [133](#)
- [134](#)
- [135](#)
- [136](#)
- [137](#)
- [138](#)
- [139](#)
- [140](#)
- [141](#)
- [142](#)
- [143](#)
- [144](#)
- [145](#)
- [146](#)
- [147](#)
- [148](#)
- [149](#)
- [150](#)
- [151](#)
- [152](#)
- [153](#)
- [154](#)
- [155](#)
- [156](#)
- [157](#)
- [158](#)
- [159](#)
- [160](#)
- [161](#)
- [162](#)
- [163](#)
- [164](#)
- [165](#)
- [166](#)
- [167](#)

- [168](#)
- [169](#)
- [170](#)
- [171](#)
- [172](#)
- [173](#)
- [174](#)
- [175](#)
- [176](#)
- [177](#)
- [178](#)
- [179](#)
- [180](#)
- [181](#)
- [182](#)
- [183](#)
- [184](#)
- [185](#)
- [186](#)
- [187](#)
- [188](#)
- [189](#)
- [190](#)
- [191](#)
- [192](#)
- [193](#)
- [194](#)
- [195](#)
- [196](#)
- [197](#)
- [198](#)
- [199](#)
- [200](#)
- [201](#)
- [202](#)
- [203](#)
- [204](#)
- [205](#)
- [206](#)

- [207](#)
 - [208](#)
 - [209](#)
 - [210](#)
 - [211](#)
 - [212](#)
 - [213](#)
 - [214](#)
 - [215](#)
 - [216](#)
 - [217](#)
 - [218](#)
 - [219](#)
 - [220](#)
 - [221](#)
 - [222](#)
 - [223](#)
 - [224](#)
 - [225](#)
 - [226](#)
-

Брайан Грин

Ткань космоса

**Пространство, время и текстура
реальности**

Предисловие

Пространство и время будоражат воображение учёных как никакие другие идеи в науке. Причина понятна. Они образуют арену реальности, формируют самую ткань космоса. Само наше существование — всё, что мы делаем, думаем и чувствуем — происходит в некоторой области пространства и в течение некоторого интервала времени. Однако наука до сих пор пытается понять, что на самом деле представляют собой пространство и время. Являются ли они реальными физическими сущностями или лишь полезными идеями? Если они реальны, то фундаментальны ли они или же возникают из более первичных конституэнтов? Что означает для пространства быть пустым? Есть ли начало у времени? Есть ли у времени стрела, неумолимо направленная из прошлого в будущее, как подсказывает повседневный опыт? Можем ли мы влиять на пространство и время? В этой книге мы проследим трёхсотлетние попытки пылкой научной мысли дать ответы (или намёки на ответы) на эти фундаментальные и глубокие вопросы о природе мироздания.

В нашем путешествии мы неоднократно столкнёмся и с другим вопросом, одновременно и всеобъемлющим, и ускользающим: что *есть* реальность? Мы, человеческие существа, имеем доступ только к нашему внутреннему опыту ощущений и мысли, поэтому как мы можем быть уверены, что они истинно отражают внешний мир? Философы уже давно осознали эту проблему. Режиссёры популяризуют эту тему с помощью сюжетов, наполненных вымышленными мирами, порождёнными изысканными нейрологическими симуляциями, которые существуют только в умах их героев. А физики, к которым отношусь и я, остро чувствуют, что видимая реальность — материя, эволюционирующая на фоне пространства и времени, — может оказаться совсем непохожей на ту, другую реальность, лежащую за пределами видимого (если она существует). Однако, поскольку наблюдения — это всё, что у нас есть, мы принимаем их всерьёз. Вместо неограниченного воображения или необузданного скептицизма мы выбираем в качестве проводника надёжные данные и математику и ищем наиболее простые, однако самые многообещающие теории, способные объяснить и предсказать результаты современных и будущих экспериментов. Это сильно ограничивает искомые теории. (Например, в этой книге вы не найдёте и намёков на то, что я

плаваю в баке с водой, подключённый проводами к тысяче мозговых стимуляторов, которые заставляют меня просто *думать*, что я сейчас пишу этот текст.) Но за последние сто лет открытия в физике заставляют нас пересмотреть обыденное отношение к реальности, и это так ошеломляет, захватывает и потрясает все устои, как самая невероятная научная фантастика. Об этой революции идей и пойдёт речь на страницах этой книги.

Многие из исследуемых вопросов суть те же самые, что на протяжении веков являлись в разных ипостасях и заставляли напрягаться умы Аристотеля, Галилея, Ньютона, Эйнштейна и многих других. И поскольку в этой книге мы описываем науку в становлении, мы прослеживаем эти вопросы так, как они были поставлены одним поколением, ниспровергнуты их последователями и уточнены и переосмыслены учёными последующих поколений.

Например, при ответе на нетривиальный вопрос — является ли абсолютно пустое пространство, как чистое полотно, реальной сущностью или просто отвлечённой идеей? — мы следуем за маятником научной мысли: Исаак Ньютон в XVII в. утверждал, что пространство реально; потом маятник качнулся вспять, и Эрнст Мах сказал, что нет, не реально; а в XX в. Эйнштейн ошеломляюще переформулировал саму суть вопроса, слив воедино пространство и время, в значительной мере опровергнув Маха. Затем мы следуем за новыми открытиями, которые снова переиначивают вопрос, переопределяя понятие «пустоты», говоря, что пространство неизбежно заполнено так называемыми квантованными полями и, возможно, однородно распределённой энергией, называемой космологической постоянной, — современным отголоском старого и дискредитированного понятия «эфир», который заполняет всё пространство. А затем мы расскажем читателю, как грядущие космические эксперименты могут подтвердить некоторые выводы Маха, которые согласуются с общей теорией относительности Эйнштейна, являя собой захватывающий образец запутанной паутины научного исследования.

В наши дни мы находим обнадеживающие результаты инфляционной космологии относительно понимания стрелы времени; богатый выбор предложений дополнительных измерений в теории струн; поразительное предположение М-теории о том, что наша Вселенная — всего лишь щепка, плавающая в более масштабном космосе; широко обсуждаемую идею о том, что наблюдаемая нами Вселенная может оказаться лишь голограммой. Мы пока не знаем, справедливы ли наши последние научные теории. Но как бы дико они не звучали, мы относимся к ним серьёзно, ибо именно

сюда нас привёл непрерывный и непреклонный поиск глубинных законов природы. Непонятная и необычная реальность ждёт нас не только на изобильной стезе научной фантастики. Она рождается на острие современных открытий физической науки.

Книга «Ткань космоса» предназначена в основном для широкого круга читателей, не имеющих особой научной подготовки, но обладающих стремлением понять устройство мироздания, что поможет им преодолеть трудности на пути понимания сложных и нетривиальных концепций. Как и в моей первой книге «Элегантная Вселенная», я старался придерживаться сути научных идей, опуская математические описания и заменяя их метафорами, аналогиями, рассказами и иллюстрациями. Когда мы подходим к самым сложным разделам, я предупреждаю об этом читателя и предлагаю короткую аннотацию для тех, кто решит только пролистать эти сложные места или вообще их опустить. Таким образом, читатель сможет пройти путём открытий и получить не только набор знаний о последних идеях в физике, но и понимание того, как и почему та или иная идея получила право на жизнь.

Студенты, просто любители науки, учителя и учёные-профессионалы также почерпнут много интересного из этой книги. Хотя в начальных главах обсуждаются необходимые, но стандартные основополагающие вопросы из теории относительности и квантовой механики, довольно необычным будет акцент на реальности понятий пространства и времени. В следующих главах речь идёт о разном — теореме Белла, экспериментах с задержанным выбором, квантовых измерениях, ускоренном расширении Вселенной, возможности получения чёрных дыр на ускорителях следующего поколения, создании удивительной машины времени, основанной на идее кротовых нор. Это лишь некоторые из обсуждаемых идей, которые познакомят читателя с самыми захватывающими и обсуждаемыми сейчас научными достижениями.

Некоторая часть излагаемого материала является спорной. Если идея ещё висит в воздухе и по поводу неё нет общепринятого мнения, я излагаю в основном тексте взгляды, считающиеся доминирующими в научном мире. По спорным вопросам в приложения вынесены различные точки зрения, для которых, как мне кажется, консенсус достигается в наибольшей степени. Некоторые учёные, особенно те, идеи которых разделяет меньшинство, будут возражать против моих суждений, но я старался нарисовать сбалансированную картину. В приложениях особо усердный читатель найдёт более полные объяснения и предостережения относительно вопросов, которые я упростил, а также (для желающих)

краткие математические дополнения к бесформульному описанию в основном тексте. Краткий глоссарий даёт пояснение к некоторым специальным научным терминам.

Даже книга такого объёма не может охватить столь фундаментальные и всеобъемлющие понятия, как пространство и время. Я сосредоточил внимание на тех идеях, которые являются одновременно и увлекательными, и важными для формирования полной картины реальности, создаваемой современной наукой. Конечно, выбор материала отражает мои личные вкусы, и я приношу извинения тем, кто считает, что их личный вклад или область их интересов не нашли должного отражения в книге.

При написании «Ткани космоса» я был счастлив чувствовать обратную связь с читателями. Это было важно для меня. Рафаэль Каспер, Любос Мотл, Дэвид Стейнхардт и Кен Винберг прочли разные варианты рукописи, некоторые неоднократно, и сделали много детальных замечаний, которые значительно улучшили ясность и точность изложения. Я им сердечно благодарен. Дэвид Альберт, Тэд Балц, Николас Болс, Трэси Дэй, Петер Демчук, Ричард Истер, Анна Холл, Кейт Голдсмит, Шели Голдстейн, Майкл Гордин, Джошуа Грин, Артур Гринспун, Гэвин Герра, Сандра Кауфман, Эдвард Кастенмейер, Роберт Крулвич, Андрей Линде, Шани Оффен, Малик Парик, Майкл Поповиц, Марлен Скалли, Джон Стахель и Ларс Стретер прочитали рукопись всю или частично и сделали ряд полезных замечаний. Андреас Альбрехт, Майкл Бассет, Сен Кэррол, Адрея Кросс, Рита Грин, Алан Гут, Марк Джексон, Дэниель Кабат, Уилл Кинни, Джастин Хури, Хиранья Пейрис, Сол Перлмуттер, Конрад Шалм, Пол Стейнхардт, Леонард Сасскинд, Нил Тьюрок, Генри Тай, Уильям Вормус и Эрик Вайнберг подарили мне радость совместного обсуждения. Я особо признателен Рафаэлю Ганнеру, чьё особое искусство настоящей дискуссии и чей настрой критиковать мои наброски оказались неоценимы. Эрик Мартинес был незаменим на производственной стадии работы над книгой, а Джейсон Сиверс был великолепен при создании иллюстраций. Я благодарен моим литературным агентам Катинке Мэтсон и Джону Брокману. И я глубоко признателен моему издателю Марти Ашеру за неиссякаемую поддержку, советы и глубокое понимание, что значительно улучшило качество представления материала.

Мои научные исследования были поддержаны Департаментом энергии, Национальным научным фондом и Фондом Альфреда П. Слоана. Я выражаю им свою искреннюю благодарность.

Часть I. Арена реальности

Глава 1. Пути к реальности

Пространство, время и почему всё таково, каково оно есть

Ни одна из книг в старом и пыльном отцовском шкафу не была под замком. Однако пока я рос, я никогда не видел, чтобы кто-нибудь вынимал их оттуда. В основном там были увесистые тома — полная история цивилизации, величайшие произведения западной литературы и другие не менее «весомые» книги, которых я уже не помню — казалось, что они буквально вдавились в полки, немного прогнувшись за десятилетия поддержки бесценного груза. А на самой верхней полке стояла тоненькая книжечка, всегда приковывающая мой взгляд, потому что казалась не на своём месте, как Гулливер в стране великанов. Оглядываясь назад, я даже не понимаю, почему прошло так много времени, прежде чем я взял в руки эту книгу. Возможно, с течением времени книги из отцовского шкафа всё больше казались не материалом для чтения, а семейной реликвией, которой любуются издавна. Однако подростковая дерзость одержала верх. Я достал книжечку, сдул с неё пыль и открыл на первой странице. Первые строчки поразили меня.

«Есть лишь одна по-настоящему серьёзная философская проблема — проблема самоубийства», — так начиналась книга. Я вздрогнул. «Имеет ли мир три измерения, руководствуется ли разум девятью или двенадцатью категориями, — шло дальше, — всё это вторично». В тексте разъяснялось, что подобные вопросы являются частью игры, в которую играет человечество, и они заслуживают внимания лишь после того, как найден ответ на первый вопрос. Это было эссе «Миф о Сизифе», написанное философом и нобелевским лауреатом Альбертом Камю. После небольшого шока смысл его слов дошёл до меня. Да, конечно, — подумал я. — Можно размышлять над чем угодно или анализировать что угодно хоть целую вечность, но настоящий вопрос состоит в том, убедят ли вас ваши размышления в том, что жизнь стоит того, чтобы её прожить. Вот к чему всё сводится. Всё остальное — детали.

Наверное, я наткнулся на книгу Камю в особенно впечатлительный период, потому что его слова врезались в мою память более чем что-либо, когда-нибудь мной прочитанное. Снова и снова думал я над тем, как разные люди — которых я встречал, или о которых слышал, или которых видел по

телевизору — ответили бы на этот главнейший вопрос. Хотя, оглядываясь назад, я должен признать, что второе его утверждение — касающееся роли научного прогресса — в конце концов захватило меня больше. Камю признавал ценность понимания структуры Вселенной, но, как я уже сказал, он отвергал возможность того, что такое понимание может быть сколь-нибудь значимо в отношении ценности жизни. Конечно, моё подростковое чтение философии экзистенциализма было примерно столь же искушённым, как чтение Бартом Симпсоном^[1] поэзии романтизма. Пусть даже и так, однако вывод Камю совершенно поразил меня. Увлекающемуся начинающему физику, каким я был, казалось, что для обоснованной оценки жизни обязательно требуется полное понимание арены жизни — Вселенной. Помнится, я подумал, что если бы наш человеческий вид жил глубоко под землёй и ещё должен был бы открыть земную поверхность, сияющее солнце, морской бриз и далёкие звёзды, или если бы эволюция пошла по другому пути, и мы имели бы только чувство осязания, так что наше знание приходило бы только от тактильных ощущений, или если бы ментальные способности человечества переставали бы развиваться в раннем детстве, так что наши эмоциональные и аналитические способности никогда бы не превосходили способности пятилетнего ребёнка, — короче говоря, если бы наш опыт рисовал нам портрет жалкой реальности, — то наше восхищение жизнью было бы основательно подорвано. И когда мы, в конце концов, нашли бы выход на земную поверхность, или когда бы мы обрели способность видеть, слышать, обонять и пробовать на вкус, или когда бы наши умы перешагнули пятилетний рубеж и стали бы такими, как сейчас, то наш коллективный взгляд на жизнь и космос, несомненно, изменился бы самым радикальным образом. Наш первоначально ограниченный взгляд на реальность привёл бы совсем к другой трактовке ответа на самый фундаментальный из всех философских вопросов.

Однако можно спросить: ну и что из того? Ведь здравый смысл подсказывает, что хотя мы можем и не понимать всего во Вселенной — всех деталей устройства материи или организации жизни, — но мы посвящены в главные мазки на полотне природы. Конечно, как нам указывал Камю, прогресс в физике, заключающийся в понимании числа пространственных измерений, или прогресс в нейробиологии, заключающийся в понимании всех организационных структур мозга, или прогресс в любой другой области науки мог бы внести мелкие недостающие штрихи в общую картину мира, но влияние этого прогресса на нашу оценку жизни и реальности оказалось бы минимальным.

Несомненно, реальность такова, какой мы её считаем; реальность дана нам в наших ощущениях.

Этого взгляда на реальность придерживаются, в той или иной степени, многие из нас, не отдавая себе в этом отчёт. Я ловлю себя на том, что в повседневной жизни думаю точно так же; легко обмануться картиной, даваемой нашими органами чувств. И всё же, десятилетия спустя после первого знакомства с утверждениями Камю я твёрдо понял, что современная наука говорит совсем иное. Глобальный урок, преподнесённый наукой в прошлом столетии, состоит в том, что человеческий опыт зачастую является обманчивым проводником на пути к истинной природе реальности. За поверхностью повседневной жизни лежит мир, который мы едва ли осознаём. Последователи оккультизма, приверженцы астрологии и люди, придерживающиеся религиозных принципов, говорящие о реальности за пределами нашего опыта, уже давно пришли к аналогичному заключению. Но не это я имею в виду. Я обращаюсь к работам изобретательных инноваторов и неустанных исследователей — учёных, — снимающих слой за слоем с «космической луковицы», разгадывая загадку за загадкой, и открывающих перед нашим взором Вселенную одновременно удивительную, незнакомую, захватывающую, элегантную и совершенно непохожую на то, что когда-либо ожидалось.

Их исследования — это что угодно, но не просто «детали». Прорывы в физике вызвали — и продолжают вызывать — существенный пересмотр наших представлений о космосе. Как и десятилетия назад, я по-прежнему убеждён в том, что Камю верно назвал вопрос ценности жизни самым насущным философским вопросом, но достижения современной физики убеждают меня в том, что оценка жизни сквозь призму повседневного опыта подобна разглядыванию картин Ван Гога через пустую бутылку из-под кока-колы. Современная наука подорвала веру в показания наших органов чувств, доказав, что зачастую они дают туманное представление о мире, в котором мы живём. Это и убедило меня в том, что физические вопросы первичны, хотя Камю отделил их и стал считать их вторичными. Оценка существования без учёта достижений современной физики подобна борьбе во тьме с неизвестным противником. Углубляя понимание истинной природы физической реальности, мы основательно пересматриваем свой взгляд на самих себя и на наше восприятие Вселенной.

Основная цель данной книги — разъяснить достижения современной физики, радикально меняющие картину реальности перед нашим взором; при этом упор будет делаться на те достижения, которые привели к

пересмотру наших представлений о пространстве и времени. Со времён Аристотеля до Эйнштейна, со времён астролябии до телескопа «Хаббл», со времён пирамид до горных обсерваторий мышление оперировало категориями пространства и времени. С наступлением современной научной эры значение этих категорий чрезвычайно возросло. Достижения физики за последние три столетия привели к пониманию того, что пространство и время являются как самыми загадочными и трудными понятиями, так и самыми действенными в научном анализе. Эти достижения также показали, что пространство и время возглавляют список старейших научных конструкций, чаще всего пересматривавшихся в ходе новых научных исследований.

Согласно Исааку Ньютону, пространство и время просто существуют, образуя пассивную универсальную космическую сцену, на которой разыгрываются все события. Согласно же его современнику и частому оппоненту Готфриду Вильгельму Лейбницу, «пространство» и «время» служат всего лишь удобным обозначением для связей между тем, где был объект и когда произошло событие, и ничем бóльшим. Однако согласно Альберту Эйнштейну пространство и время являются исходным материалом, лежащим в основе реальности. Своими теориями относительности Эйнштейн встряхнул наши представления о пространстве и времени и вскрыл их принципиальную роль в эволюции Вселенной. С этого момента пространство и время стали жемчужинами физики. Они одновременно и знакомы, и таинственны; достижение полного понимания пространства и времени стало для физиков самой вызывающей задачей и самым желанным призом.

Научные достижения, о которых мы будем говорить в данной книге, по-разному вплетаются в ткань пространства и времени. Некоторые идеи будут оспаривать основы представлений о пространстве и времени, которые в течение столетий, если не тысячелетий, не подвергались никакому сомнению. Другие идеи будут устанавливать связь между нашим теоретическим пониманием пространства и времени и теми их характерными чертами, которые мы обычно ощущаем. Третьи идеи поднимут вопросы, не решаемые в рамках обычных ограниченных представлений.

Мы совсем немного будем затрагивать философию (и совсем не будем говорить о самоубийстве и смысле жизни). Но мы совершенно ничем не будем сдерживать себя в нашем научном стремлении раскрыть таинство пространства и времени. С решительным намерением выяснить истинную природу пространства и времени мы будем изучать их и в привычных, и в

выходящих за рамки обычного условия: начиная с масштабов мельчайшей крупинки Вселенной и самых ранних моментов её существования до самых далёких пределов Вселенной и самого отдалённого её будущего. Мы не придём ни к каким окончательным выводам, поскольку история пространства и времени ещё не полностью написана. Но мы познакомимся с рядом достижений — некоторые покажутся очень странными, некоторые принесут удовлетворение, некоторые могут быть проверены в эксперименте, а другие пока останутся чисто спекулятивными, — которые покажут, на сколько мы приблизились к тому, чтобы своим умом охватить ткань космоса и прикоснуться к истинной структуре реальности.

Классическая реальность

Историки расходятся в том, когда началась современная научная эпоха, но, несомненно, начало ей положили труды Галилео Галилея, Рене Декарта и Исаака Ньютона. В те дни был заложен новый метод изучения природы — научный подход, возникший благодаря тому, что данные, полученные в ходе наблюдений земных и небесных явлений, всё больше указывали — всё происходящее в космосе подчиняется строгому порядку, описываемому на языке математического анализа. Пионеры современного научного мышления приводили доводы в пользу того, что происходящее во Вселенной можно не только объяснять, но и предсказывать, если встать на правильную точку зрения. Была открыта предсказательная сила науки — способность предсказывать моменты будущего, причём делать это согласовано и количественно.

Первые научные исследования фокусировались на том, что можно было видеть или ощущать в повседневной жизни. Галилей сбрасывал предметы разного веса с наклонной башни (как гласит легенда) и наблюдал за скатыванием шаров по наклонной плоскости; Ньютон наблюдал за падением яблок (как гласит легенда) и изучал орбиту Луны. Целью этих исследований было настроить зарождающийся научный слух на гармонию природы. Конечно, объектом опытов служила физическая реальность, но ставилась задача уловить гармонию и причину ритмичности и регулярности явлений. Много воспетых и безвестных героев внесли свой вклад в быстрый и впечатляющий прогресс, но Ньютон затмил всех. С помощью нескольких уравнений он описал всё известное о движении на Земле и в небесах и тем самым положил начало *классической физике*.

За десятилетия, последовавшие за работой Ньютона, его уравнения

были включены в стройную математическую структуру, что существенно расширило как их охват, так и их практическую ценность. Классическая физика постепенно становилась утончённой и зрелой научной дисциплиной. Но путеводной звездой для всех этих достижений были прозрения Ньютона. Даже сегодня, более чем триста лет спустя, уравнения Ньютона можно видеть на университетских досках по всему миру; по этим уравнениям рассчитываются траектории движения космических аппаратов, и те же уравнения Ньютона можно встретить в сложных расчётах на переднем крае науки. Ньютон описал многообразие физических явлений в рамках единого теоретического подхода.

Но, формулируя свои законы движения, Ньютон наткнулся на трудную проблему, которая будет особенно важна в нашей истории (глава 2). Все знают, что объекты могут двигаться, но как насчёт арены, на которой происходит движение? Это пространство, — ответим мы хором. Но что такое пространство? — спросил бы далее Ньютон. Является ли пространство реальной физической сущностью или оно представляет собой абстрактную идею, рождённую в ходе человеческого усилия понять космос? Ньютон сознавал, что надо ответить на этот ключевой вопрос, ведь иначе, без опоры на понятия пространства и времени, его уравнения движения окажутся попросту бессмысленными. Понимание требует контекста; прозрение должно иметь под собой твёрдую почву.

В нескольких предложениях в «Математических началах натуральной философии» Ньютон изложил свою концепцию пространства и времени, объявив их абсолютными и вечными сущностями, предоставляющими для Вселенной жёсткую и неизменную арену. Согласно Ньютону, пространство и время образуют невидимый каркас, придающий форму и структуру Вселенной.

Но не все согласились. Некоторые убедительно возражали, что не очень-то разумно приписывать существование тому, что невозможно почувствовать или ухватить или на что невозможно повлиять. Но сила объяснений и предсказаний на основе уравнений Ньютона умирала критиков. В течение следующих двух столетий его концепция абсолютного пространства и времени утвердилась как догма.

Релятивистская реальность

Классический взгляд Ньютона давал ощущение удовлетворения. Он не только описывал с поразительной точностью природные явления, но и

детали этого описания — математическая трактовка — полностью согласовывались с опытом. Если вы толкнёте объект, он начнёт ускоряться. Чем сильнее вы бросите мяч, тем сильнее он ударится о стену. Если вы надавливаете на объект, вы чувствуете, что он оказывает противодействие. Чем массивнее объект, тем сильнее он притягивается к земле. Таковы свойства природы, и в уравнениях Ньютона они отражаются как в чистой воде. Действие законов Ньютонов понятно всем, имеющим хотя бы минимальную математическую подготовку. Классическая физика давала прочный фундамент для человеческой интуиции.

Ньютон ввёл в свои уравнения и силу гравитации, но только в 1860-х гг. шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл включил в классическую физику силы электричества и магнетизма. Для этого Максвеллу потребовались дополнительные уравнения и более изощрённая математика. Но его новые уравнения столь же успешно описывали явления электричества и магнетизма, как уравнения Ньютона описывали движение. В конце XIX в. стало казаться, что никакие секреты Вселенной не могут устоять перед мощью человеческого интеллекта.

Действительно, после успешного включения в классические уравнения сил электричества и магнетизма всё больше росло ощущение, что изучение теоретической физики вскоре будет завершено. Некоторые считали, что физика быстро становится законченной наукой, и её законы будут вскоре высечены в камне. В 1894 г. известный физик-экспериментатор Альберт Майкельсон отметил, что «большинство основополагающих принципов прочно установлены», и сослался на «именитого учёного» (большинство полагают, что это был английский физик лорд Кельвин), сказавшего, что всё, что остаётся — это определить некоторые числа с бóльшим числом знаков после запятой.^[1] В 1900 г. Кельвин сам заявил, что горизонт омрачают лишь «два облачка», одно из которых относится к свойствам движения света, а другое — к аспектам излучения нагретых тел,^[2] но в целом это всего лишь детали, которые, несомненно, вскоре будут прояснены.

За следующее десятилетие всё изменилось. Как и ожидалось, две проблемы, поставленные лордом Кельвином, были вскоре разрешены, но они оказались далеко не малозначащими. Каждая из них вызвала целую революцию, и каждая требовала фундаментально переписать законы природы. Были низвержены классические концепции пространства, времени и реальности — те самые, которые сотни лет не только исправно работали, но и лаконично выражали наше интуитивное ощущение мира.

Релятивистская революция, рассеивающая первое из «облачков» Кельвина, произошла в 1905 и 1915 гг., когда Альберт Эйнштейн закончил создание своей специальной и общей теорий относительности (глава 3). Разгадывая загадки, связанные с электричеством, магнетизмом и движением света, Эйнштейн понял, что ньютоновская концепция пространства и времени, краеугольный камень классической физики, содержит изъяны. В течение нескольких напряжённых недель весной 1905 г. он установил, что пространство и время не абсолютны, как думал Ньютон, а сплетены друг с другом и относительны, что бросает вызов обычному опыту. Десять лет спустя Эйнштейн вбил последний гвоздь в крышку гроба ньютоновских представлений, переписав законы гравитации. На этот раз он не только показал, что пространство и время являются частями единого целого, но и показал, что за счёт своего искажения и искривления они участвуют в космической эволюции. Вместо того чтобы быть жёсткими и неизменными структурами, как представлял себе Ньютон, пространство и время в переработке Эйнштейна оказались гибкими и динамичными.

Две теории относительности относятся к самым ценным из достижений человечества, и этими теориями Эйнштейн опрокинул ньютоновское представление о реальности. Несмотря на то что ньютоновская физика математически охватывает многое из переживаемого нами на физическом уровне, описываемая ей реальность оказалась расходящейся с реальностью нашего мира. Наша реальность — релятивистская. Однако благодаря тому, что расхождение между классической и релятивистской реальностью проявляется только в экстремальных условиях (условиях экстремальных скоростей и гравитации), ньютоновская физика даёт очень точное приближение, полезное во многих ситуациях. Но «полезность» и «реальность» — совсем разные категории. Как мы увидим дальше, свойства пространства и времени, с которыми большинство из нас сроднилось, отражают, как оказалось, неверное ньютоновское представление.

Квантовая реальность

Вторая аномалия, упомянутая лордом Кельвиным, привела к квантовой революции — одному из величайших переворотов, который когда-либо происходил в человеческом понимании. Когда улеглось пламя и рассеялся дым, на фасаде здания классической физики остались

выжженными знаками квантовой реальности.

Основное утверждение классической физики состоит в том, что если знать положение и скорость всех объектов в заданный момент времени, то с помощью уравнений Ньютона вместе с уравнениями Максвелла можно определить их положение и скорость в любой момент времени, в прошлом или будущем. Классическая физика прямо заявляет, что прошлое и будущее запечатлены в настоящем. И с этим согласны также общая и специальная теории относительности. Хотя релятивистские понятия прошлого и будущего являются более изощрёнными, чем их классические аналоги (главы 3 и 5), уравнения обеих релятивистских теорий столь же полно описывают прошлое и будущее на основании данных о настоящем.

Однако в 1930-х гг. физики были вынуждены разработать совершенно новую концептуальную схему, названную *квантовой механикой*. Совершенно неожиданно они пришли к тому, что только квантовые законы могут решить множество загадок и объяснить множество новых данных, касающихся атомной и субатомной областей. Однако квантовые законы гласят, что даже если провести самые точные измерения, то самое лучшее, на что можно надеяться, — это предсказать *вероятность* того или иного события в будущем или прошлом. Согласно квантовой механике Вселенная не запечатлена в настоящем, а участвует в некоей игре случая.

И хотя нет единого мнения, как именно следует интерпретировать уравнения квантовой механики, однако большинство физиков солидарны в том, что вероятность глубоко вплетена в ткань квантовой реальности. В то время как человеческая интуиция и её отражение в классической физике рисуют перед собой реальность, в которой всё происходящее идёт определённому тем *или* иным образом, то квантовая механика описывает реальность, в которой события подвешены в состоянии неопределённости и могут идти частично тем *и* частично иным образом. События становятся определёнными, только когда подходящее наблюдение вынуждает их покинуть квантовую неопределённость и остановиться на каком-либо выборе. Однако реализующийся исход не может быть предсказан — мы можем предсказать лишь вероятность того, что события пойдут тем или иным образом.

Это, откровенно говоря, очень странно. Мы не приучены к реальности, остающейся неоднозначной до её восприятия. Но странность квантовой механики на этом не кончается. Не менее удивительным является свойство, описанное в 1935 г. Эйнштейном в соавторстве с двумя молодыми коллегами, Натаном Розеном и Борисом Подольским, в работе, которая была направлена против квантовой теории.^[3] По иронии научного

прогресса, эта работа Эйнштейна теперь может рассматриваться как одна из первых, указавших на то, что согласно квантовой механике нечто, что вы делаете здесь, может быть *мгновенно* связано с тем, что происходит где-то там, независимо от расстояния. Эйнштейн считал нелепой такую мгновенную связь и интерпретировал её появление в рамках квантово-механической математики как доказательство того, что над теорией надо ещё немало поработать, прежде чем она достигнет приемлемой формы. Однако в 1980-х гг., когда как теоретические, так и технологические достижения позволили направить мощь экспериментальных исследований на этот предполагаемый квантовый абсурд, выяснилось, что мгновенная связь между тем, что происходит в очень удалённых друг от друга местах, действительно *может* иметь место. В строгих лабораторных условиях действительно происходит то, что Эйнштейн считал абсурдом (глава 4).

Влияние этого свойства квантовой механики на наше представление о реальности является предметом современных исследований. Многие физики, и я в том числе, считают его частью радикального квантового пересмотра смысла и свойств пространства. Обычно пространственное разделение влечёт физическую независимость. Если вы хотите контролировать то, что происходит на другом конце футбольного поля, вам надо пойти туда или, по крайней мере, послать кого-то или что-то (помощника тренера, звуковые волны, передающие речь, вспышку света, чтобы привлечь чьё-то внимание и т. д.) через всё поле, чтобы передать своё указание. Если вы не делаете этого (если вы остаётесь пространственно отдалены), вы не сможете ни на что повлиять, поскольку разделяющее пространство гарантирует отсутствие физической связи. Квантовая механика бросает вызов справедливости этой точки зрения, выявляя возможность, по крайней мере при определённых условиях, побеждать пространство; дальнедействующие квантовые связи могут игнорировать пространственную отдалённость. Два объекта могут находиться далеко друг от друга, но с точки зрения квантовой механики они как бы составляют единую сущность. Более того, из-за тесной связи между пространством и временем, обнаруженной Эйнштейном, квантовые связи также имеют временные щупальца. Мы вкратце познакомимся с некоторыми поистине чудесными экспериментами, в которых недавно был установлен ряд поразительных пространственно-временных взаимосвязей, вытекающих из квантовой механики, и эти эксперименты, как мы увидим, бросают мощный вызов классическому, интуитивному взгляду на мир, которого придерживаются многие из нас.

Несмотря на многие впечатляющие достижения, остаётся одна

основная черта времени — направленность времени из прошлого в будущее, — которую не объясняет ни теория относительности, ни квантовая механика. Убедительный прогресс в этом отношении достигнут только в области физики, называемой *космологией*.

Космологическая реальность

Открыть глаза на истинную природу Вселенной всегда было одной из важнейших целей физики. Трудно вообразить себе более ошеломляющее занятие, чем осмысление (которое происходило в течение последнего столетия) того, что реальность, которую мы ощущаем, является лишь слабым отблеском настоящей реальности. Но физика столь же ответственна и за разъяснение элементов реальности, которые мы действительно переживаем. Из нашего беглого взгляда на историю физики может показаться, что с обычным нашим опытом физика разобралась ещё до девятнадцатого столетия. До некоторой степени это верно. Но даже сегодня мы далеки от его полного понимания. И среди составных частей нашего обычного опыта, не поддающихся полному объяснению, есть одна, которая погружает нас в одну из глубочайших нерешённых загадок современной физики — загадку, которую великий английский физик сэръ Артур Эддингтон назвал *стрелой времени*^[4].

Мы принимаем как данное, что события разворачиваются во времени в определённом направлении. Яйца разбиваются, но не собираются снова в целое; свечи тают, но не восстанавливаются; наша память всегда хранит прошлое, но не будущее; люди стареют, но не молодеют. Эта асимметрия правит нашими жизнями; это различие между «вперёд» и «назад» во времени является превалирующим элементом переживаемой реальности. Если бы между «вперёд» и «назад» во времени была бы та же симметрия, что и между «левым» и «правым» или между «вперёд» и «назад» в пространстве, то мир стал бы неузнаваемым. Разбившиеся яйца снова становились бы целыми столь же часто, как и разбивались; сгоревшие свечи восстанавливались бы столь же часто, как и сгорали; мы помнили бы столько же о будущем, сколько и о прошлом; люди молодели бы столь же часто, как и старели. Несомненно, такая симметричная по времени реальность не является нашей реальностью. Но откуда возникает асимметрия времени? Что ответственно за самое основное из всех свойств времени?

Оказывается, известные и принятые законы физики не имеют такой

асимметрии (глава 6): в рамках этих законов время может течь как в прямом, так и в обратном направлении, и при этом сами законы не меняются. *И это ведёт к грандиозному парадоксу.* Ничто в уравнениях фундаментальной физики не указывает на различие в направлениях времени, однако это совершенно расходится со всем, что нам известно из обычного повседневного опыта.^[5]

Удивительно, что, хотя мы рассматриваем элементарные черты повседневной жизни, самое убедительное разрешение этого разногласия между фундаментальной физикой и обычным опытом требует рассмотрения самого необычного события — возникновения Вселенной. Понимание этого уходит своими корнями в работу великого физика девятнадцатого столетия Людвиг Больцмана; затем оно было развито многими учёными, в особенности английским математиком Роджером Пенроузом. Как мы увидим, особые физические условия при возникновении Вселенной (высокоорганизованная среда в момент Большого взрыва или сразу после него) могли впечатать в реальность направление времени, примерно как заводят часы путём закручивания пружины до высокоупорядоченного начального состояния, что позволяет затем часам тикать и отмерять своё время. Таким образом, в некотором смысле (который мы ещё уточним) процесс разбивания яйца (в противоположность обратному гипотетическому процессу) носит отпечаток условий рождения Вселенной примерно 14 млрд лет тому назад.

Эта неожиданная связь между повседневным опытом и ранней Вселенной даёт понимание того, почему события всегда разворачиваются одним образом, и никогда — противоположным, но она не полностью решает загадку стрелы времени. Эта связь лишь переводит загадку в область *космологии* — науки, изучающей происхождение и эволюцию космоса в целом — и вынуждает нас искать, действительно ли Вселенная была высокоупорядоченна в самом начале, как того требует объяснение стрелы времени.

Космология — одна из древнейших тем, привлекавших человечество. И это не удивительно. Мы все любим истории, а какая история может быть величественнее истории творения? В течение нескольких последних тысячелетий религиозные и философские системы вносили свой вклад в копилку версий того, как всё — Вселенная — началось. За свою долгую историю наука также пыталась приложить руку к этому вопросу. Но только открытие общей теории относительности Эйнштейна ознаменовало рождение современной научной космологии.

Вскоре после того, как Эйнштейн опубликовал свою общую теорию

относительности, он вместе с другими исследователями применил её ко Вселенной в целом. Через несколько десятилетий их исследования привели к подходу, который теперь называется *теорией Большого взрыва*, и этот подход успешно объяснил множество астрономических наблюдений (глава 8). В середине 1960-х гг. теория Большого взрыва получила новое подтверждение: в наблюдениях был обнаружен приблизительно однородный фон микроволнового излучения, пронизывающего всё пространство и невидимого для невооружённого глаза, но легко регистрируемого микроволновыми детекторами, — этот фон был предсказан теорией. И в 1970-х гг., после десятилетия более тщательных проверок и существенного прогресса в понимании того, как основные составляющие космоса отвечают на экстремальные изменения плотности и температуры, теория Большого взрыва заняла своё место в качестве лидирующей космологической теории (глава 9).

Несмотря на успех, теория была не лишена и значительных недостатков. В её рамках трудно было объяснить, почему пространство в целом имеет форму, обнаруженную в ходе детальных астрономических наблюдений, и она никак не объясняла, почему температура микроволнового излучения, интенсивно изучавшегося с момента его обнаружения, практически одинакова по всему небу. Более того, что очень важно для истории, о которой мы говорим, теория Большого взрыва убедительно не объясняла, почему Вселенная могла быть высокоупорядоченной сразу после своего возникновения, как это требуется для объяснения стрелы времени.

Поиски ответов на этот и другие открытые вопросы привели к главному прорыву в конце 1970-х – начале 1980-х гг., известному как *инфляционная космология* (глава 10). Инфляционная космология модифицирует теорию Большого взрыва путём введения в самом начале зарождения Вселенной чрезвычайно короткого промежутка времени, за который Вселенная колоссально расширилась (более чем в миллион триллионов триллионов раз за менее чем одну миллионную от одной триллионной от одной триллионной доли секунды). Как станет ясно, в ходе этого колоссального расширения Вселенная проходит большой путь, позволяющий заполнить пробелы, оставленные моделью Большого взрыва, — объяснить форму пространства и однородность микроволнового излучения, а также предложить объяснение того, почему ранняя Вселенная могла быть высокоупорядоченной, и тем самым продвинуться в объяснении как астрономических наблюдений, так и стрелы времени (глава 11).

При этом, несмотря на достигнутые успехи, инфляционная космология

в течение двух десятилетий скрывала собственную загадку. Как и стандартная теория Большого взрыва, инфляционная космология базируется на уравнениях общей теории относительности Эйнштейна. Хотя многочисленные исследования подтвердили пригодность уравнений Эйнштейна для точного описания крупных и массивных объектов, но физикам давно было известно, что для точного теоретического анализа сверхмалых объектов — таких как наблюдаемая Вселенная спустя доли секунды после своего рождения — требуется квантовая механика. Однако проблема состоит в том, что попытки объединить уравнения общей теории относительности с уравнениями квантовой механики приводят к губительным последствиям. Уравнения совершенно разваливаются, и это не позволяет нам ответить на вопрос, как возникла Вселенная, и определить, были ли при её рождении условия, необходимые для объяснения стрелы времени.

Не будет преувеличением описать эту ситуацию как кошмар теоретика: отсутствие теоретических инструментов для анализа очень важной области, лежащей за пределами экспериментальных возможностей. И, поскольку пространство и время столь тесно сплетены в этой особой недоступной области рождения Вселенной, для понимания пространства и времени совершенно необходимы уравнения, которые могут справиться с экстремальными условиями колоссальной плотности, энергии и температуры в самые ранние моменты возникновения Вселенной. Многие физики считают, что эти уравнения даст *единая теория*.

Объединённая реальность

В течение нескольких столетий физики пытались объединить наше знание мира, показав, что разнообразные и кажущиеся нам различными явления на самом деле подчиняются одной и той же системе физических законов. Эта унификация — или объяснение широчайшего круга физических явлений с помощью минимального набора физических принципов — стала пожизненной страстью Эйнштейна. С помощью двух своих теорий относительности Эйнштейн объединил пространство, время и гравитацию. Но этот успех только подстегнул его стремление мыслить шире. Он мечтал найти единую систему, которая охватила бы все законы природы; он назвал эту систему *единой теорией*. Хотя и ходили слухи, что Эйнштейн нашёл единую теорию, все они оказались беспочвенными; мечта Эйнштейна осталась несбывшейся.

Одержимые поиски единой теории в последние тридцать лет его жизни отдалили Эйнштейна от основного течения физических исследований. Многие молодые учёные смотрели на его целенаправленный поиск величайшей теории как на чужество гения, свернувшего в конце жизни на неверный путь. Но спустя десятилетия после смерти Эйнштейна всё больше физиков берутся продолжить его неоконченный поиск. Сейчас разработка единой теории находится среди самых важных и актуальных проблем теоретической физики.

За многие годы физики обнаружили, что основным препятствием для создания единой теории является фундаментальный конфликт между двумя главнейшими достижениями физики XX в.: общей теорией относительности и квантовой механикой. Хотя эти две теории обычно применяются в совсем разных областях (общая теория относительности — для очень больших объектов типа звёзд и галактик, а квантовая механика — для микроскопических объектов типа молекул и атомов), но каждая из них претендует на универсальность, применимость во всех областях. Однако, как было упомянуто выше, все попытки объединить уравнения этих теорий приводили к бессмысленным результатам. Например, при использовании квантовой механики совместно с общей теорией относительности для вычисления вероятности того или иного события, включающего гравитацию, неизменно получалось не нечто вроде 24, 63 или 91%, а *бесконечность*. Это не означает, что вероятность столь высока и что можно ставить на неё все свои деньги. Вероятность выше 100% не имеет смысла. Вычисления, приводящие к бесконечной вероятности, просто указывают на нестыковку уравнений общей теории относительности и квантовой механики.

В течение более чем полувека учёные знали об этом конфликте общей теории относительности и квантовой механики, но мало кто из них чувствовал настоятельную необходимость разрешить это противоречие. Большинство учёных просто предпочитали использовать для анализа крупных и массивных объектов только общую теорию относительности, а для анализа мельчайших и легчайших частиц — только квантовую механику, удерживая эти теории «на безопасном» расстоянии друг от друга. Такая политика «разрядки напряжённости» позволила добиться поразительных успехов в областях макромира и микромира, но не принесла окончательного успокоения.

Ведь оставалась «пограничная зона» (экстремальные ситуации, когда массивные объекты обладают микроскопическими размерами), в которой требовалось опираться как на общую теорию относительности, так и на

квантовую механику. Два самых известных примера из этой области: центральная область чёрной дыры, где целая звезда сжалась под собственной тяжестью до размеров миниатюрной точки, и Большой взрыв, знаменующий рождение нашей Вселенной, — когда, как предполагается, вся видимая часть Вселенной была сжата до размеров, меньше атомных. Без успешного объединения общей теории относительности и квантовой механики коллапс звёзд и рождение Вселенной навсегда останутся неразгаданными тайнами. Многие учёные предпочитали откладывать решение этих проблем, пока не решены более простые насущные задачи.

Но некоторые исследователи не могли с этим смириться. Конфликт между известными законами означает несостоятельность в попытке ухватить глубокую истину вещей, и этого достаточно, чтобы учёные не могли успокоиться. Но при погружении в эту проблему обнаруживалось, что вода глубока, а течение бурно. Прошло немало времени, но исследователи продвинулись слабо; перспектива выглядела безрадостной. И всё же стойкость тех, кто неизменно придерживался выбранного курса и поддерживал мечту об объединении общей теории относительности и квантовой механики, была вознаграждена. Сейчас по освящённому ими пути физики приближаются к гармоничному слиянию законов большого и малого. И главным претендентом, с чем согласятся многие, является *теория суперструн* (глава 12).

Как мы увидим, теория суперструн начинается с нового ответа на старый вопрос: каковы мельчайшие неделимые компоненты материи? В течение многих десятилетий общепринятым был следующий ответ: материя состоит из частиц (электронов и кварков), которые можно представлять в качестве неделимых точек, не имеющих ни размера, ни внутренней структуры. Общепринятая теория гласит (и эксперименты подтверждают это), что разнообразные сочетания элементарных компонент порождают протоны, нейтроны и всё многообразие атомов и молекул, составляющих полный набор того, с чем мы только ни сталкиваемся. Теория суперструн говорит другое. Она не отрицает ключевую роль электронов, кварков и других элементарных частиц, обнаруженных в экспериментах, но утверждает, что эти частицы не являются точками. Согласно теории суперструн любая частица представляет собой мельчайшую ниточку или струну энергии, в сотни миллиардов миллиардов раз меньшую размеров атомного ядра (что выходит за пределы доступных нам сейчас возможностей исследования). И подобно тому как струна виолончели может вибрировать с различными частотами, вызывая различные музыкальные тона, так и нити теории суперструн могут

вибрировать различным образом. Однако вибрации этих нитей, как утверждает теория суперструн, соответствуют не нотам, а различным свойствам элементарных частиц. Микроскопической струне, вибрирующей одним образом, соответствует масса и электрический заряд электрона; согласно теории суперструн такая вибрационная мода может представлять то, что мы традиционно называем электроном. Мельчайшая струна, вибрирующая другим образом, может иметь свойства, соответствующие кварку, нейтрину или какой-либо другой элементарной частице. Таким образом, в теории суперструн объединяются все виды элементарных частиц, каждая из которых представляет одну из вибрационных мод одной и той же сущности.

Переход от точек к струнам, которые так малы, что выглядят как точки, может показаться не ахти каким революционным изменением. Но этот переход на самом деле существенен. Стартуя со столь скромного начала, теория суперструн объединяет общую теорию относительности и квантовую механику в единую связную теорию, изгоняя пагубные бесконечные вероятности, преследовавшие все ранее предпринимавшиеся попытки объединения. Более того, теория суперструн обладает достаточной широтой, чтобы вплести в единое полотно как все силы природы, так и все частицы материи. Короче говоря, теория суперструн вышла первым кандидатом на единую теорию, о которой грезил Эйнштейн.

Если эти утверждения верны, то они знаменуют собой грандиозный шаг вперёд. Но самое поразительное, к чему приводит теория суперструн и что взволновало бы сердце Эйнштейна, заключается в изменении наших представлений о ткани космоса. Как мы увидим, предлагаемое теорией суперструн объединение общей теории относительности и квантовой механики математически осуществимо только в том случае, если мы согласимся на ещё один переворот в наших представлениях о пространстве и времени. Вместо привычных нам трёх пространственных и одного временного измерения теория суперструн требует *деяти* пространственных и одного временного измерения. А в самом революционном воплощении теории струн, известном как *М-теория*, для великого объединения требуется *десять* пространственных и одно временное измерение — космический субстрат, состоящий из одиннадцати пространственно-временных измерений. Тот факт, что мы не видим этих дополнительных измерений, теория суперструн объясняет тем, что *до сих пор мы улавливали лишь тонкий срез реальности*.

Конечно, неподтверждённое существование дополнительных измерений может также означать и то, что их попросту нет и, значит,

теория суперструн неверна. Однако не следует делать столь поспешных выводов. Ещё за десятилетия до возникновения теории суперструн самые смелые учёные, включая Эйнштейна, раздумывали над идеей существования дополнительных пространственных измерений, не видимых нами, а также делали предположения о том, где они могли бы скрываться. Теоретики, работающие над теорией суперструн, значительно развили эти идеи и пришли к выводу, что дополнительные измерения либо свёрнуты до таких крохотных размеров, что ни мы, ни наше оборудование не можем их увидеть (глава 12), либо велики, но невидимы на тех путях, на которых мы сейчас исследуем Вселенную (глава 13). В обоих случаях мы имеем очень далеко идущие последствия. Геометрическая форма микроскопических свёрнутых измерений, воздействуя на вибрационные моды струн, может дать ответ на самые основополагающие вопросы, такие как: почему в нашей Вселенной могут существовать звёзды и планеты? А если дополнительные измерения макроскопические, то, возможно, рядом с нами существуют соседние миры (соседние не в обычном пространстве, а с точки зрения дополнительных измерений), о которых мы до сих пор и не догадывались. Смелая идея существования дополнительных измерений является не просто каким-то теоретическим «журавлём в небе». Возможно, вскоре её удастся проверить. Если дополнительные измерения действительно существуют, то эксперименты на следующем поколении ускорителей элементарных частиц могут привести к таким впечатляющим результатам, как синтез микроскопических чёрных дыр или открытие целого семейства новых частиц (глава 13). Эти и другие поразительные результаты могут послужить первым доказательством существования других измерений, помимо видимых нами, и подвести нас на шаг ближе к утверждению теории суперструн в качестве искомой единой теории.

Если теория суперструн окажется верной, то мы должны будем признать, что известная нам реальность является лишь тонким шифром, драпирующим плотную и богато текстурированную ткань космической реальности. Вопреки заявлению Камю, определение числа пространственных измерений (и, в частности, открытие, что их не только три) окажется чем-то гораздо большим, чем незначительной деталью. Открытие дополнительных измерений покажет нам, что весь наш человеческий опыт прошёл мимо самого основополагающего и существенного аспекта устройства Вселенной.

Реальность прошлого и будущего

Исследователи оптимистичны в том, что в лице теории суперструн они наконец-то обретут конструкцию, которая не сломается ни при каких условиях, сколь бы экстремальными они ни были, и позволит нам когда-нибудь узнать, что происходило в самый момент зарождения известной нам Вселенной. К настоящему времени ещё никто не приобрёл достаточной смелости, чтобы напрямую применить эту теорию к описанию Большого взрыва, но изучение космологических явлений с помощью теории суперструн стало одним из самых приоритетных направлений современных исследований. За последние несколько лет в рамках крупных исследовательских проектов на базе теории суперструн возникли новые космологические концепции (глава 13), предложены новые способы проверки теории суперструн с помощью астрофизических наблюдений, а также появились первые догадки по поводу того, какую роль теория суперструн может играть в объяснении стрелы времени.

Стрела времени благодаря своей роли, определяющей нашу повседневную жизнь, и благодаря своей сокровенной связи с происхождением Вселенной попадает на стык между той реальностью, которую мы ощущаем, и той более тонкой реальностью, которую стремится открыть передовая наука. В этом качестве вопрос стрелы времени проходит красной нитью через многие теории и периодически будет всплывать в следующих главах. Так мы приближаемся к настоящей реальности. Время является одним из самых доминирующих факторов, очерчивающих нашу жизнь. По мере разработки теории суперструн и М-теории будет углубляться наше понимание космологических явлений и постоянно будут заостряться вопросы происхождения времени и стрелы времени. Если дать волю фантазии, то можно даже представить, что глубина нашего понимания однажды позволит нам путешествовать по пространству-времени и тем самым освободиться от пространственно-временных цепей, которыми мы были скованы в течение тысячелетий (глава 15).

Конечно, вряд ли когда-нибудь мы достигнем такого могущества. Но даже если мы так никогда и не сможем управлять пространством и временем, то всё же глубокое понимание их сути будет важно само по себе. Наше постижение истинной природы пространства и времени явится свидетельством возможностей человеческого интеллекта. Мы наконец-то познаем пространство и время — молчаливых вездесущих разметчиков, очерчивающих внешние границы человеческого опыта.

Возмужание в пространстве и времени

Много лет тому назад, перевернув последнюю страницу «Мифа о Сизифе», я был удивлён ощущению оптимизма, венчавшему это эссе. В конце концов, история о человеке, осуждённом вкатывать камень на вершину горы, прекрасно зная, что камень скатится назад и надо будет начинать всё сначала, — это отнюдь не история со счастливым концом. И всё же Камю увидел глубокую надежду в способности Сизифа выражать свободную волю, бороться с непреодолимыми препятствиями и утверждать свой выбор, даже занимаясь абсурдным трудом в равнодушной Вселенной. Отбросив всё, находящееся за пределами непосредственного опыта, и прекратив поиски более глубокого понимания или глубинного смысла, Сизиф, — утверждает Камю, — одерживает победу.

Я был глубоко поражён способности Камю находить надежду там, где большинство других увидят лишь безысходность. Но ни в школьные годы, ни позднее я никогда не мог согласиться с утверждением Камю, что более глубокое понимание Вселенной не сделает жизнь более богатой или стоящей. В то время как Сизиф был героем Камю, моими героями стали величайшие учёные — Ньютон, Эйнштейн, Нильс Бор и Ричард Фейнман. А когда я прочёл фейнмановское описание розы — в котором он объяснял, сколь неизмеримо обогатилось его наслаждение ароматом и красотой цветка благодаря знанию физики, позволившему ему также удивляться великолепию молекулярных, атомных и субатомных процессов, — я был по-настоящему захвачен. Я хотел того, что описал Фейнман: понять Вселенную на всех возможных уровнях, а не только на уровне, доступном нашим несовершенным человеческим чувствам. Поиск глубочайшего понимания космоса стал целью моей жизни.

Став профессиональным физиком, я давно уже понял, что было много наивного в моём школьном увлечении физикой. Физики не проводят дни, любуясь цветами в состоянии космического благоговения и мечтательности. Вместо этого много времени мы тратим на схватку со сложными математическими уравнениями, выведенными на исписанной мелом доске. Прогресс может быть медленным. Многообещающие идеи часто никуда не приводят. Таков характер научных исследований. И всё же, даже в периоды самых скромных достижений я нахожу, что усилия, потраченные на поиски и расчёты, лишь заставили меня ощутить более близкую связь с космосом. Я нахожу, что мы приближаемся к познанию Вселенной не только, когда разгадываем её тайны, но и погружая себя в них. Найденные ответы — это замечательно. Ответы, подтверждённые экспериментом, — ещё более крупное достижение. Но даже ответы, оказывающиеся в конечном счёте неверными, являются результатом

глубокого погружения в космос — погружения, проливающего яркий свет на рассматриваемые вопросы и, значит, на саму Вселенную. И даже если срывается вниз и откатывается назад «камень», связанный с каким-то научным исследованием, мы, тем не менее, кое-чему учимся, и наше понимание космоса обогащается.

Конечно, история науки показывает, что «камень» нашего коллективного научного исследования (с вкладом учёных всех стран и всех времён) не скатывается с горы на самый низ. В отличие от Сизифа, мы не начинаем с «нуля». Каждое новое поколение учёных стартует с уровня, достигнутого предшественниками, воздавая должное их тяжёлому труду, проницаемости и творчеству, и продвигается ещё немного вперёд. Новые теории и более точные измерения являются отметкой научного прогресса, и этот прогресс строится на том, что было достигнуто ранее, и строительная площадка почти никогда не расчищается полностью. Благодаря этому наша работа далека от того, чтобы быть абсурдной или напрасной. Вкатывая «камень» на гору, мы выполняем благородную работу, дающую нам наслаждение: исследуем место, которое мы зовём своим домом, открываем чудеса и передаём своё знание в руки тех, кто следует за нами.

Биологическому виду, который по космическим меркам только что встал на ноги, предстоит решить грандиозные задачи. И всё же, за последние триста лет, переходя от классической к релятивистской, а затем к квантовой реальности и нацелившись теперь на исследование объединённой реальности, наши умы и инструменты охватили грандиозный свод пространства и времени, приблизив нас к пониманию мира, оказавшегося искусным мастером маскировки. Продолжая медленно раскрывать тайны космоса, мы приближаемся к истине. Исследования уже далеко продвинулись, но многие чувствуют, что наш человеческий вид только выходит из состояния детства.

Наше возмужание здесь, на окраине Млечного Пути^{[161](#)} происходит уже долго. Тем или иным путём мы исследуем наш мир и размышляем о космосе тысячи лет. В основном мы делали лишь краткие вылазки в неизвестное, всякий раз возвращаясь домой чуть мудрее, но, по большому счёту, мало чего достигали. Потребовалась дерзость Ньютона, чтобы водрузить флаг научного исследования и никогда больше не повернуть вспять. С тех пор мы идём всё дальше. И все наши путешествия начинались с простого вопроса.

Что такое пространство?

Глава 2. Вселенная и ведро

Пространство — это человеческая абстракция или физическая сущность?

Нечасто случается так, что простое ведро с водой становится предметом, вокруг которого разгораются трёхсотлетние споры. Но это ведро было предметом эксперимента сэра Исаака Ньютона, который был описан им в 1689 г. и который затем будоражил умы многих выдающихся физиков. Эксперимент был простой: возьмём ведро, наполненное водой, подвесим его на верёвке, затем хорошо закрутим верёвку и отпустим ведро. Ведро начнёт вращаться, но вода поначалу остаётся почти неподвижной, а её поверхность — практически плоской. По мере разгона ведра его движение постепенно передаётся за счёт трения воде, и вода тоже начинает вращаться. При этом поверхность воды принимает вогнутую форму, поднимаясь к краям и опускаясь в центре (см. рис. 2.1).

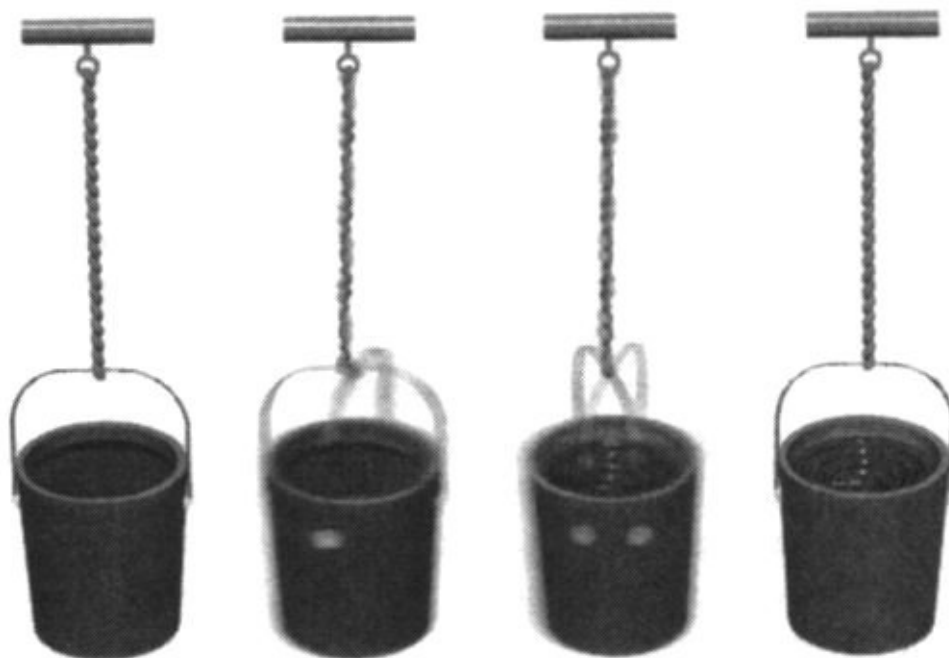


Рис. 2.1. Когда ведро только начинает вращаться, поверхность воды сначала остаётся плоской. Затем, по мере того как вода вовлекается в движение, её поверхность становится вогнутой и остаётся вогнутой даже тогда, когда ведро

замедляется и останавливается

Такой вот простенький эксперимент — не бог весть что. Но после небольших размышлений это ведро с вращающейся водой крайне озадачивает. И, поскольку мы не добились полной ясности за три столетия, объяснение этого эксперимента считается одним из самых важных шагов к познанию структуры Вселенной. Чтобы понять, почему это так, необходимо сделать некоторый исторический экскурс, но он стоит того.

Относительность до Эйнштейна

Слово «относительность» ассоциируется у нас с Эйнштейном, но это понятие возникло гораздо раньше. Галилей, Ньютон и многие другие прекрасно понимали, что *скорость* — как её величина, так и направление — относительна. Например, с точки зрения игрока в бейсбол сильно брошенный мяч может приближаться к игроку со скоростью 150 км/ч. Но с точки зрения мяча это *игрок* движется к нему со скоростью 150 км/ч. Оба утверждения верны; это всего лишь вопрос точки зрения. Движение имеет только относительный смысл: скорость объекта может быть определена только по отношению к другому объекту. Вы, вероятно, уже сталкивались с этим. Когда вы сидите в поезде и видите за окном другой движущийся поезд, вы не можете сразу же сказать, какой поезд на самом деле движется. Галилей описывал это, приводя в своём примере транспортное средство своих дней — корабль. «Подбросьте монетку на плавно плывущем корабле, — говорил Галилей, — и она упадёт точно к вашим ногам, как и на суше. Со своей точки зрения вы с полным правом можете заявить, что это вы неподвижны, а вода накатывает на корабль. И поскольку с этой точки зрения вы неподвижны, то движение монетки по отношению к вам будет точно таким же, как если бы вы стояли на суше».

Конечно, бывают ситуации, в которых движение кажется абсолютным, когда вы чувствуете его и можете заявить, не опираясь на сравнение с чем-то внешним, что вы определённо двигаетесь. Так бывает в случае *ускоренного* движения, при котором меняется величина скорости и/или её направление. Если лодка внезапно кренится, замедляет свой ход или ускоряется, либо меняет направление движения на излучине реки, либо попадает в водоворот и начинает вращаться, вы точно знаете, что вы двигаетесь. И вы осознаёте это, не глядя по сторонам и не сравнивая своё положение с положением какого-либо предмета вне лодки, выбранного за точку отсчёта. Даже если ваши глаза закрыты, вы знаете, что двигаетесь,

потому что чувствуете это. Таким образом, хотя вы не можете почувствовать движение с постоянной скоростью в неизменном направлении — движение с постоянным вектором скорости, как его называют, — однако вы можете почувствовать изменения своей скорости.

Но если вы чуть призадумаетесь, то заметите нечто странное во всём этом. Что такого особенного в изменениях скорости, что позволяет их выделять и придавать им некий внутренний смысл? Если скорость имеет смысл лишь при сравнении — если вы говорите, что что-то движется, то надо указывать *по отношению к чему* — то почему выходит, что с изменениями скорости дело обстоит совсем по-другому, и не надо проводить никаких сравнений? Фактически, не может ли оказаться, что *на самом деле* требуется какое-то сравнение? Не может ли быть так, что некое неявное или скрытое сравнение происходит всякий раз, когда мы ссылаемся на ускоренное движение или ощущаем его? Нас сейчас интересует этот центральный вопрос, поскольку, как это ни может показаться удивительным, он касается глубочайших проблем понимания пространства и времени.

Прозрение Галилея, касающееся движения, в особенности его утверждение о том, что сама Земля движется, навлекло на него гнев инквизиции. Стремясь избежать похожей участи, более осторожный Декарт в своих «Началах философии» облёк своё понимание движения в уклончивую формулировку, которая примерно тридцать лет спустя не смогла устоять под испытующим взглядом Ньютона. Декарт говорил, что объекты сопротивляются изменению своего состояния движения: неподвижный объект будет оставаться неподвижным, пока кто-то или что-то не вынудит его двигаться; объект, движущийся с постоянной скоростью по прямой линии, всегда и будет так двигаться, если кто-то или что-то не вынудит его изменить скорость или свернуть с прямой линии. Но что, — спросил Ньютон, — в действительности означают эти понятия «неподвижности» или «движения с постоянной скоростью по прямой линии»? Неподвижность или постоянная скорость с чьей точки зрения? Если скорость не постоянна, то по отношению к чему или с чьей точки зрения она не постоянна? Декарт сознательно опустил наиболее тонкие аспекты смысла движения, но Ньютон понял, что ключевые вопросы остались без ответа.

Ньютон — человек, столь неистовый в поисках истины, что однажды, изучая анатомию глаза, воткнул себе тупую иглу между глазным яблоком и углублением в кости, а позже, будучи директором Монетного двора, послал на виселицу более сотни фальшивомонетчиков — не мог потерпеть

сомнительных или неполных объяснений. Поэтому он решил прояснить суть дела. Это привело его к рассмотрению ведра с водой.^[7]

Ведро

Итак, ведро с водой вращается, и поверхность воды принимает вогнутую форму. Ньютон поставил следующий вопрос: *почему* поверхность воды принимает эту форму? Потому что вода вращается, — ответите вы, — и подобно тому, как мы вдавливаемся в боковую стенку машины, когда автомобиль делает резкий поворот, так и вращающаяся вода испытывает давление со стороны стенок ведра; и воде ничего не остаётся, как приподняться вверх. Это здравое рассуждение, но оно не отвечает на суть вопроса Ньютона. Ньютон хотел бы понять, что это *значит*, когда говорят, что вода вращается: вращается по отношению к чему? Ньютон подошёл к самой сути движения и был далёк от того, чтобы принять утверждение, что ускоренное движение, такое как вращение, не требует никаких сравнений с чем-то внешним.^[2]

Было бы естественным взять само ведро в качестве системы отсчёта, т. е. говорить о движении воды по отношению к ведру. Но, как заметил Ньютон, такой подход ничего не объясняет. Действительно, в самом начале, когда мы отпускаем ведро, между ним и водой *есть относительное* движение, поскольку вода не начинает сразу же двигаться вместе с ведром. При этом поверхность воды остаётся *плоской*. Затем, когда вода увлекается ведром и начинает вращаться вместе с ним, уже *нет относительного* движения между ними, но поверхность воды принимает *вогнутую* форму. Так что, приняв в качестве системы отсчёта ведро, мы приходим к прямо противоположному результату, чем тот, что можно было бы ожидать: когда есть относительное движение, поверхность воды плоская; а когда относительного движения нет, поверхность — вогнутая.

Посмотрим, что будет дальше с ведром Ньютона. Поскольку ведро продолжает вращаться, то верёвка снова закрутится (теперь уже в другом направлении) и постепенно остановит ведро; затем в какой-то момент ведро на мгновение замрёт, тогда как вода в нём будет продолжать вращаться. В этот момент относительное движение между водой и ведром будет *тем же самым*, каким оно было в самом начале эксперимента (за исключением несущественной разницы в направлении вращения: по или против часовой стрелки), но форма поверхности воды будет *другой* (теперь она вогнутая, тогда как раньше была плоской). Это лишний раз доказывает,

что с помощью относительного движения ведра и воды нельзя объяснить форму поверхности воды.

Отвергнув ведро в качестве подходящей системы отсчёта для описания движения воды, Ньютон сделал следующий смелый шаг. Вообразите, — предложил он, — похожий эксперимент, проводимый в совершенно пустом космосе. Мы не сможем провести точно такой же эксперимент, поскольку форма поверхности воды зависит и от земного притяжения, отсутствующего в новом эксперименте. Поэтому вообразим громадное ведро — размерами с развлекательный аттракцион, — дрейфующее во тьме пустого космического пространства, и представим, что некий бесстрашный астронавт, Гомер^[3], пристёгнут внутри к стенке этого ведра. (В действительности, Ньютон использовал не этот пример; он рассматривал два камня, связанные верёвкой, но суть дела от этого не меняется.) Индикатором вращения ведра (аналогом того, как воду прижимало к стенкам, из-за чего её поверхность становилась вогнутой) будет служить то, что Гомер будет *чувствовать* силу, вдавливающую его во внутреннюю стенку ведра, из-за чего натянется кожа его лица, живот несколько вдавится, и волосы вытянутся по направлению к стенке ведра. И вот вопрос: в *полностью* пустом пространстве — где нет ни Солнца, ни Земли, ни воздуха, ни пончиков, ни чего-либо ещё — что могло бы послужить тем ориентиром, по отношению к которому вращается ведро? Поначалу, поскольку мы вообразили совершенно пустое пространство, в котором нет ничего, кроме ведра и его содержимого, можно сделать вывод, что просто нет ничего, что послужило бы таким ориентиром. Ньютон не согласился с этим.

В качестве подходящей системы отсчёта он выбрал первоисходноеместилище — *само пространство*. Он выдвинул прозрачную пустую арену, на которой все мы находимся и на которой происходит всякое движение, в качестве реальной, физической сущности, которую он назвал *абсолютным пространством*.^[8] Мы не можем прикоснуться к абсолютному пространству или ощутить его с помощью своих органов чувств, но, тем не менее, Ньютон заявил, что абсолютное пространство есть нечто. Это есть то, что даёт самую правильную систему отсчёта для описания движения. Объект по-настоящему неподвижен, если он неподвижен по отношению к абсолютному пространству. Объект по-настоящему движется, если он движется по отношению к абсолютному пространству. И, самое главное, как заключил Ньютон, объект по-настоящему ускоряется, если он ускоряется по отношению к абсолютному

пространству.

Ньютон использовал это предположение для следующего объяснения эксперимента с ведром. В начале эксперимента ведро вращается по отношению к абсолютному пространству, но вода неподвижна по отношению к абсолютному пространству. Вот почему поверхность воды сначала плоская. По мере того как вода увлекается ведром, она начинает вращаться по отношению к абсолютному пространству, и поэтому её поверхность становится вогнутой. Когда ведро останавливается из-за перекручивания верёвки, вода продолжает вращаться (причём вращаться по отношению к абсолютному пространству), и поэтому её поверхность остаётся вогнутой. Таким образом, в то время как относительным движением между водой и ведром нельзя объяснить наблюдение, это можно сделать, рассматривая относительное движение между водой и абсолютным пространством. Само пространство служит истинной системой отсчёта для определения движения.

Ведро — это только пример; данное рассуждение, конечно же, носит общий характер. Согласно представлениям Ньютона, когда вы поворачиваете, находясь за рулём автомобиля, вы чувствуете изменение направления движения, поскольку ускоренно двигаетесь по отношению к абсолютному пространству. Когда самолёт разгоняется по взлётной полосе, вы чувствуете давление со стороны самолётного кресла, поскольку вы ускоряетесь по отношению к абсолютному пространству. Когда вы вращаетесь на катке, у вас самопроизвольно разбрасываются руки, поскольку вы ускоряетесь по отношению к абсолютному пространству. Напротив, если бы кто-нибудь смог вращать весь каток, а вы бы оставались неподвижными (в идеальной ситуации, когда отсутствует трение), то между вами и льдом было бы то же самое относительное движение, но ваши руки не разбрасывались бы в стороны, поскольку вы бы не ускорялись по отношению к абсолютному пространству. И, чтобы вас не сбили с толку несущественные детали, относящиеся к человеческому телу, приведём пример самого Ньютона: когда два камня, связанные верёвкой, вращаются в пустом пространстве, верёвка натягивается, поскольку камни ускоряются по отношению к абсолютному пространству. За абсолютным пространством остаётся последнее слово в определении того, что есть движение.

Но что такое абсолютное пространство на самом деле? Ньютон ответил на этот вопрос, лишь постулировав существование абсолютного пространства. Сначала он написал в своих «Началах»^[4]: «Так как время, пространство, место и движение составляют понятия общеизвестные, я их

не определяю»^[9], не пытаясь дать строгое и точное определение этим понятиям. Его следующие слова стали широкоизвестными: «Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остаётся всегда одинаковым и неподвижным».^[5] Иными словами, абсолютное пространство просто существует, и так было и будет всегда. Но есть намёки на то, что сам Ньютон не был полностью удовлетворён, просто декларируя существование и значимость чего-то, что нельзя непосредственно увидеть, измерить или на что невозможно повлиять. Он написал:

«Распознавание истинных движений отдельных тел и точное их разграничение от кажущихся весьма трудно, ибо части того неподвижного пространства, о котором говорилось и в котором совершаются истинные движения тел, не ощущаются нашими чувствами».^[6]

Так Ньютон оставил нас в довольно неловком положении. Он положил абсолютное пространство в центр описания самого основного и существенного элемента физики — движения, — но оставил его определение нечётким и признал собственную неудовлетворённость тем, что поместил такое важное яйцо в такую эфемерную корзину. Многие другие разделили его неудовлетворённость.

Трудности с пространством

Эйнштейн однажды сказал, что если кто-то употребляет такие слова, как «красный», «тяжёлый» или «разочарованный», мы, в основном, понимаем, что он имеет в виду. Но что касается слова «пространство», «связь которого с психологическим опытом менее непосредственная, то здесь существует далеко идущая неопределённость толкования»^[10]. Эта неопределённость имеет давнюю историю: попытки ухватить смысл понятия «пространство» начинаются во времена античности. Демокрит, Эпикур, Лукреций, Пифагор, Платон, Аристотель и многие их последователи тем или иным образом боролись со значением слова «пространство». Есть ли разница между пространством и материей? Существует такая вещь, как пустое пространство? Исключают ли друг друга пространство и материя? Конечно или бесконечно пространство?

В течение тысячелетий философские рассуждения о пространстве часто возникали в тандеме с теологическими вопросами. Представление о вездесущем Боге приводит к идее о божественном характере пространства. Эту линию разрабатывал Генри Мор, богослов и философ XVII в., который,

как считают некоторые, был одним из наставников Ньютона.^[11] Он полагал, что если пространство было бы пусто, оно не могло бы существовать, но он также считал, что это наблюдение не имеет большого смысла, поскольку, даже когда в пространстве нет материальных объектов, оно всё же наполнено духом, так что пространство *никогда* не является действительно пустым. Ньютон сам взял на вооружение эту идею, позволив пространству быть наполненным «духовной субстанцией», как и материальной субстанцией, но он осторожно добавил, что такая духовная субстанция «не может препятствовать движению материи; она препятствует не больше, чем если бы ничего не было на пути движения»^[12]. Абсолютное пространство, заявил Ньютон, является сенсориумом Бога.

Подобные философские и религиозные рассуждения о пространстве могут быть трудно опровержимыми и привлекательными, но, как отметил Эйнштейн, им не хватает главного — чёткости описания. Однако *есть* фундаментальный и точно поставленный вопрос, вытекающий из таких размышлений: следует ли нам приписать независимую реальность пространству, как и другим более обычным материальным объектам, вроде, например, книги, которую вы сейчас держите, или нам следует считать пространство просто удобным словом для описания взаимосвязей между обычными материальными объектами?

Великий немецкий философ Готфрид Вильгельм фон Лейбниц, современник Ньютона, твёрдо верил, что пространство не существует в каком-либо общепринятом смысле. Разговоры о пространстве, заявлял он, являются не более, чем удобным и привычным способом описания положения объектов по отношению друг к другу. Но без объектов в пространстве само пространство не имеет независимого смысла или существования. Возьмём, к примеру, английский алфавит. Он определяет порядок двадцати шести букв, т. е. взаимосвязи типа «*a* находится рядом с *b*», «*d* стоит на пять букв раньше *j*», «*x* через две буквы от *u*» и т. д. Но без букв алфавит не имеет смысла — он не имеет «сверхбуквенного», независимого существования. Алфавит возникает лишь вместе с буквами, чей лексикографический порядок он отражает. Лейбниц заявлял, что то же самое верно и для пространства: пространство не имеет смысла иначе, как служа естественным языком для описания взаимного положения различных объектов. Согласно Лейбницу, если из пространства убрать все объекты (если пространство стало бы полностью пустым), то оно было бы столь же бессмысленным, как и алфавит без букв.

Лейбниц выдвинул ряд аргументов в поддержку этой так называемой *реляционной* позиции. Например, он говорил, что если бы пространство действительно существовало как сущность, как некая «фоновая» субстанция, то Богу пришлось бы выбирать, где в этой субстанции поместить Вселенную. Но как Бог, чьи решения всегда имеют прочное основание и никогда не случайны или бессистемны, мог выделить какое-то одно место в однородном пустом пространстве, чтобы поместить туда Вселенную, если все места одинаковы? Конечно, с научной точки зрения такие аргументы имеют странный привкус, но если убрать теологический элемент, как сам Лейбниц и делал в других своих рассуждениях, то мы остаёмся с трудными проблемами: каково положение Вселенной в пространстве? Если Вселенная сдвинется как целое — оставив относительное положение материальных объектов неизменным — на десять метров вправо или влево, то как мы об этом узнаем? Какова скорость всей Вселенной в этой субстанции пространства? Если мы в принципе не можем обнаружить пространство или изменения в пространстве, то как мы можем утверждать, что оно действительно существует?

Вот здесь Ньютон и привёл свой пример с ведром, который резко изменил характер дебатов. Ньютон соглашался, что некоторые характеристики пространства, возможно, трудно или даже невозможно обнаружить напрямую, но в то же время он утверждал, что существование абсолютного пространства приводит к наблюдаемым следствиям: ускоренные движения, такие как вращение ведра, есть ускоренные движения по отношению к абсолютному пространству. Следовательно, согласно Ньютону, вогнутая форма воды является следствием существования абсолютного пространства. И раз уж есть надёжное свидетельство существования чего-то, сколь бы косвенным не было это свидетельство, то Ньютон заключил, что дискуссия окончена. Ньютон перевёл полемику о пространстве из области философских рассуждений в область научно проверяемых данных. Эффект был ощутимый. В дальнейшем Лейбниц был вынужден признать: «Я допускаю, что есть разница между истинным абсолютным движением тела и простым относительным изменением его положения по отношению к другому телу»^[13]. Это не было капитуляцией по отношению к ньютоновскому абсолютному пространству, но жёсткой реляционной позиции был нанесён серьёзный удар.

В течение следующих двух столетий аргументы Лейбница и других учёных, выступавших против приписывания пространству независимой

реальности, едва ли находили отклик в научном сообществе.^[14] Маятник явно качнулся в сторону ньютоновского взгляда на пространство; центральное место заняли его законы движения, базирующиеся на концепции абсолютного пространства. Несомненно, успех этих законов при описании наблюдаемых явлений оказался самой веской причиной для их принятия. Однако интересно отметить, что сам Ньютон считал все свои достижения в физике просто прочным основанием для поддержки своего по-настоящему важного открытия: абсолютного пространства.^[15] Для Ньютона всё сводилось к концепции пространства.

Мах и смысл пространства

Когда я был подростком, во время прогулок по улицам Манхэттена мы с отцом обычно играли в такую игру. Один из нас незаметно останавливал свой взгляд на чём-то — проезжающем автобусе, голубе, севшем на подоконник, человеке, выронившем монету, — и описывал, как происходящее видится с необычной точки зрения колеса автобуса, летящего голубя или падающей монеты. Задача состояла в том, чтобы по загадочному описанию типа «Я передвигаюсь по тёмной цилиндрической поверхности, окружённой низкими неровными стенами, а с неба спускается огромный пучок толстых белых завитков» догадаться, что это точка зрения муравья, ползущего по хот-догу, на который уличный продавец кладёт гарнир из квашеной капусты. Хотя мы перестали играть в эту игру задолго до того, как я начал изучать физику, эта игра, по крайней мере отчасти, была виновна в том, что я испытал сильную неудовлетворённость, когда встретился с законами Ньютона.

Игра поощряла видение мира с различных точек зрения и подчёркивала, что какая-то точка зрения столь же законна, как и любая другая. Но, согласно Ньютону, хотя вы, несомненно, вольны выбирать любую точку зрения на мир, разные точки зрения не являются одинаково хорошо обоснованными. С точки зрения муравья, сидящего на коньке фигуриста, вращаются лёд и каток; с точки зрения зрителя с трибуны — вращается фигурист. Эти две разные точки зрения выглядят совершенно равноправными, имеющими под собой равное основание и устанавливающими симметричную связь, в которой всё одинаково вращается по отношению друг к другу. И всё же, согласно Ньютону, одна из этих точек зрения более правильна, чем другая, так как если *на самом деле* вращается фигурист, то его руки будет тянуть в разные стороны, тогда как

если *на самом деле* вращается каток, то его руки никуда тянуть не будет. Принятие абсолютного ньютоновского пространства означает принятие концепции абсолютного ускорения и, в частности, принятие совершенно точного ответа на вопрос, кто или что *на самом деле* вращается. Я пытался понять, как это может быть верным. Все книги и все учителя, к которым я обращался, соглашались, что при рассмотрении движения с постоянной скоростью имеет смысл только относительное движение; так почему же, гадал я, ускоренное движение так отличается? Почему бы *относительному* ускорению, как и относительной скорости, не быть единственно значимой вещью при рассмотрении движения с переменной скоростью? Существование абсолютного пространства говорило об обратном, но мне это казалось очень странным.

Гораздо позже я узнал, что в последние несколько столетий многие физики и философы — иногда шумно, иногда тихо — бились над тем же самым вопросом. Хотя казалось, ньютоновское ведро явно указывает на то, что именно абсолютное пространство определяет по-настоящему законную точку зрения (если что-то или кто-то вращается по отношению к абсолютному пространству, тогда это что-то или кто-то *на самом деле* вращается; в противном случае — нет), такое представление не удовлетворяло многих из тех, кто размышлял над этими вопросами. Помимо интуитивного ощущения того, что ни одна точка зрения не может быть «более верной», чем другая, и помимо в высшей степени здравого предположения Лейбница, что имеет смысл только относительное движение материальных объектов, концепция абсолютного пространства озадачивала многих тем, что это абсолютное пространство позволяет нам распознавать истинное ускоренное движение, как в примере с ведром, тогда как оно не даёт нам способа распознавать истинное движение с постоянной скоростью. В конце концов, если абсолютное пространство действительно существует, то оно должно давать точку отсчёта для распознавания *любого* движения, не только ускоренного. Если абсолютное пространство действительно существует, то почему оно не даёт способа определения положения в абсолютном смысле, так, чтобы не требовалось использовать описание нашего положения относительно других материальных тел, определяющих систему отсчёта? И если абсолютное пространство действительно существует, то как получается, что оно может влиять на нас (например, растягивая руки в стороны при вращении), а мы на него не можем?

За столетия, прошедшие после работы Ньютона, эти вопросы изредка обсуждались, но только в середине XIX в., когда проблемой абсолютного

пространства занялся австрийский физик и философ Эрнст Мах, был предложен новый, смелый и проницательный взгляд на пространство — и этот взгляд, среди прочего, в дальнейшем оказал глубокое влияние на Альберта Эйнштейна.

Чтобы понять точку зрения Маха — или, точнее, наше современное прочтение идей, часто приписываемых Маху,^[7] — давайте на минутку вернёмся к ньютоновскому ведру. Дело в том, что в аргументации Ньютона кое-что не учтено. В эксперименте с ведром требуется объяснить, почему поверхность воды плоская в одном случае и вогнутая в другом. В поисках объяснения мы рассмотрели две ситуации и поняли, что главное отличие состояло в том, вращалась вода или нет. Естественно, мы пытались объяснить форму поверхности воды состоянием её движения. Но вот в чём дело: перед введением абсолютного пространства Ньютон рассматривал только ведро в качестве возможной системы отсчёта для определения движения воды и, как мы видели, этот подход потерпел неудачу. Но есть и другие системы отсчёта, по которым можно судить о движении воды; такую систему отсчёта можно связать, например, с лабораторией, в которой проходит эксперимент, — с её полом, потолком и стенами. Или, если мы проводим эксперимент солнечным днём в открытом поле, то в качестве «стационарной» системы отсчёта для определения того, вращается ли вода, можно взять окружающие здания или деревья либо почву под нашими ногами. А если мы вдруг решим провести такой эксперимент в открытом космосе, то в качестве стационарной системы отсчёта можно взять далёкие звёзды.

Это ведёт к следующему вопросу. Может быть Ньютон, чересчур легко отбросил ведро в качестве подходящей системы отсчёта, что помешало ему обратить внимание на то относительное движение, которое мы способны наблюдать в обыденной жизни, — такое как относительное движение между водой и лабораторией, или водой и землёй, или водой и неподвижными звёздами на небе? Возможно ли, что такое относительное движение *может* быть ответственным за форму поверхности воды, устраняя необходимость во введении концепции абсолютного пространства? Таким был ход рассуждений Маха в 1870-х гг.

Чтобы лучше понять точку зрения Маха, вообразите, что вы находитесь в открытом космосе, с ощущением тишины, неподвижности и невесомости. Вы осматриваетесь и видите далёкие звёзды, и они тоже кажутся вам совершенно неподвижными. (Настоящий момент дзен-буддизма.) Затем кто-то, проплывая мимо, толкает вас, и вы начинаете вращаться. Вы заметите две вещи. Во-первых, вы почувствуете, как ваши

руки и ноги начнёт тянуть в разные стороны, и если вы не будете сопротивляться, они раскинутся. Во-вторых, далёкие звёзды уже больше не будут выглядеть неподвижными: они будут казаться описывающими огромные окружности. Вы обнаружите тесную связь между ощущаемой вами силой и движением далёких звёзд. Запомним это, поскольку мы проведём тот же эксперимент, но в других условиях.

Теперь представьте, что вы находитесь в *совершенно* пустом пространстве: нет ни звёзд, ни галактик, ни планет, ни воздуха, ничего кроме тотальной черноты. (Настоящий момент экзистенциализма.) И если теперь вы начнёте вращаться, ощутите ли вы это? Будет ли тянуть в стороны ваши руки и ноги? Опыт нашей повседневной жизни ведёт к ответу «да»: всякий раз, когда мы переходим из состояния, в котором вращения нет (состояния, в котором мы не ощущаем ничего особенного), к вращению, мы чувствуем разницу, ощущая силу, стремящуюся раскинуть в стороны наши руки и ноги. Но в описанной только что ситуации никто из нас никогда не был. В известной нам Вселенной всегда присутствуют другие материальные объекты, либо вблизи, либо, по крайней мере, где-то далеко (как далёкие звёзды), которые могут служить системой отсчёта для нашего движения. Однако в описанном примере совершенно невозможно отличить состояние «вращения» от «не-вращения», сравнивая своё положение с положением других материальных объектов; просто *нет* никаких других материальных объектов. Мах принял это к сведению и сделал один гигантский шаг вперёд. Он предположил, что в этом случае не может быть способа *ощутить* разницу между состояниями «вращения» и «не-вращения». Точнее, Мах предположил, что в совершенно пустой Вселенной *нет разницы* между вращением и не-вращением — нет понятия движения или ускорения, если нет точек отсчёта для сравнения, — так что вращение и не-вращение есть одно и то же. Если эксперимент Ньютона с двумя камнями, связанными верёвкой, провести в совершенно пустом пространстве, то, по мнению Маха, верёвка останется ненатянутой. Если вы начнёте вращаться в совершенно пустом пространстве, то ваши руки и ноги не будут тянуть в разные стороны, вы вообще ничего не почувствуете.

Это очень нетривиальное предположение. Чтобы по-настоящему понять его, нужно глубоко вникнуть в ситуацию и ясно представить однородную кромешную тьму совершенно пустого пространства. Это не как в тёмной комнате, когда вы чувствуете пол под ногами, и крошечные лучики света просачиваются снаружи через дверь или окно; ведь *нет ничего*, так что нет ни пола, ни лучиков света или чего-то ещё, что вы могли бы увидеть или почувствовать. Вы окутаны коконом совершенно

однородной тьмы, так что совершенно не с чем сравнивать своё положение. А без такого сравнения, заключает Мах, теряют смысл сами представления о движении и ускорении. Это означает не просто и не только то, что вы не почувствуете вращения, — это более фундаментально. В совершенно пустой Вселенной состояние неподвижности и состояние однородного вращения неотличимы друг от друга.^[8]

Ньютон, конечно, не согласился бы. Он бы заявил, что даже совершенно пустое пространство всё же включает в себе *пространство*. И хотя пространство неосознано и не воспринимается непосредственно, Ньютон утверждает, что оно всё же даёт нечто, относительно чего можно судить о движении материальных объектов. Но не забывайте, как Ньютон пришёл к этому выводу: он рассматривал вращательное движение и *предположил*, что результат эксперимента, проведённого в лабораторных условиях (поверхность воды во вращающемся ведре становится вогнутой; Гомер чувствует давление со стороны стенки; ваши руки тянет в стороны при вращении; натягивается верёвка, связывающая два камня) будет тем же, если провести тот же эксперимент в пустом пространстве. Это предположение привело его к поиску чего-то в пустом пространстве, по отношению к чему можно определить движение, и он пришёл к тому, что этим чем-то является само пространство. Мах усомнился в основном предположении: он заявил, что происходящее в лаборатории отличается от того, что произошло бы в совершенно пустом пространстве.

Это был первый серьёзный вызов позиции Ньютона за более чем двести лет, и в течение ряда лет он будоражил умы физиков (и даже не только физиков: в 1909 г., проживая в Лондоне, Владимир Ленин написал философский памфлет, в котором, среди прочего, обсуждались аспекты работы Маха^[16]). Но если Мах прав, и в совершенно пустом пространстве нет понятия вращения — такое положение дел устранило бы оправдание для введения ньютоновского абсолютного пространства, — то всё же остаётся необъяснённым земной эксперимент с ведром, в котором вода определённо принимает вогнутую форму. Без обращения к абсолютному пространству — если абсолютное пространство не есть что-то — как бы Мах объяснил форму поверхности воды? Ответ приходит из размышлений над простым возражением против представлений Маха.

Мах, движение и звёзды

Представим себе не совсем пустую Вселенную, как представлялось

Маху, но Вселенную лишь с горсткой звёзд, рассыпанных по небу. Если теперь провести эксперимент с вращением в космическом пространстве, то звёзды — даже если они и кажутся крошечными точками света, приходящего с громаднейшего расстояния — дадут способ судить о состоянии вашего движения. Если вы начнёте вращаться, то удалённые точки света начнут описывать круги вокруг вас. И поскольку звёзды дают систему отсчёта, позволяющую различать состояния «вращения» и «невращения», то следует ожидать, что вы тоже сможете почувствовать вращение. Но как несколько удалённых звёзд могут приводить к такой разнице? Как их присутствие или отсутствие может служить переключателем, включающим/выключающим ощущение вращения (или, шире, ощущение любого ускоренного движения)? Если вы можете почувствовать вращательное движение во Вселенной со всего лишь несколькими удалёнными звёздами, то, возможно, это означает, что идея Маха попросту неверна — может быть, как полагал Ньютон, в совершенно пустой Вселенной вы всё же почувствовали бы вращение.

Мах отвечает на это возражение. В совершенно пустой Вселенной, согласно Маху, вы ничего не почувствуете, если начнёте вращаться (точнее, там нет даже понятия вращения). На другом конце спектра, во Вселенной, наполненной всеми звёздами и другими материальными объектами, существующими в нашей Вселенной, начав вращаться, вы почувствуете силу, разбрасывающую в стороны ваши руки и ноги. (Попробуйте это.) И Мах предположил, что во Вселенной, не совсем пустой, но содержащей меньше материи, чем наша Вселенная, при вращении вы почувствуете силу, хотя и меньшую, чем в нашей Вселенной, однако не равную нулю. То есть ощущаемая вами сила пропорциональна количеству материи во Вселенной. Если вы начнёте вращаться во Вселенной с одной-единственной звездой, то почувствуете совсем крошечную силу. Во Вселенной с двумя звёздами сила будет чуть больше и т. д., пока вы не дойдёте до Вселенной с таким же материальным содержанием, как и наша, в которой почувствуете привычную вам силу вращения. В этой теории сила, которую вы чувствуете из-за ускорения, появляется как коллективный эффект, коллективное влияние всей материи во Вселенной.

Опять же, это предположение справедливо для всех видов ускоренного движения, а не только вращения. Когда вы сидите в самолёте, разгоняющемся по взлётной полосе, когда резко тормозит машина, когда начинает подниматься лифт, ощущаемая вами сила является, согласно Маху, результатом коллективного влияния всей материи, составляющей Вселенную. Если бы материи было больше, вы почувствовали бы большую

силу. Если бы материи было меньше, вы почувствовали бы меньшую силу. А если бы вообще не было материи, то вы ничего бы и не почувствовали. Так что из рассуждений Маха следует, что имеет значение только относительное движение и относительное ускорение. *Вы чувствуете ускорение только тогда, когда ускоряетесь по отношению к среднему распределению материи, присутствующей в космосе.* Мах утверждает, что при отсутствии другой материи, не имея ничего, с чем можно было бы сравнить своё положение, вы не сможете ощутить ускорение.

Для многих физиков идеи Маха оказались самыми привлекательными идеями о космосе, выдвинутыми за последние полтора столетия. Поколения физиков отказывались по-настоящему признать, что неприкасаемая, неуловимая ткань пространства действительно существует — что она представляет собой нечто достаточно субстанциональное, чтобы служить окончательной, абсолютной системой отсчёта для движения. Многим казалось абсурдным или, по крайней мере, научно несостоятельным основывать понимание движения на чём-то совершенно неуловимом, до такой степени находящимся за пределами наших чувств, что граничит с мистикой. Но тех же физиков преследовал вопрос: как же иначе объяснить эксперимент Ньютона с ведром? Идеи Маха воодушевляли, поскольку они позволяли дать новое объяснение, такое, в котором пространство не является чем-то реально существующим, — ответ, уходящий корнями в реляционную концепцию пространства, отстаиваемую Лейбницем. С точки зрения Маха пространство очень близко к тому, что представлял Лейбниц, — что это только язык для выражения взаимного расположения разных объектов. Но, как и алфавит без букв, пространство не имеет независимого существования.

Мах против Ньютона

Став студентом, я узнал об идеях Маха, и они оказались для меня настоящей находкой. Здесь наконец-то была теория пространства и движения, которая полностью уравнивала все точки зрения, поскольку имели смысл только относительная скорость и относительное ускорение. В отличие от ньютоновской системы отсчёта (чего-то невидимого, названного абсолютным пространством), предложенную Махом систему отсчёта могут увидеть все — это материя, распределённая по космосу. Я почувствовал уверенность, что Мах пошёл по правильному пути. Я также узнал, что был не одинок в этом; я последовал за длинной чередой физиков, включающей

и Альберта Эйнштейна, которые были захвачены идеями Маха.

Прав ли Мах? Был ли Ньютон так захвачен вращением своего ведра, что пришёл к неверному выводу о природе пространства? Существует ли абсолютное пространство Ньютона или маятник безвозвратно качнулся в сторону реляционной концепции? В течение первых десятилетий после того, как Мах предложил свои идеи, на эти вопросы нельзя было ответить. Причина была, главным образом, в том, что предположение Маха не было законченной теорией, поскольку он никогда не уточнял, *как* материя, составляющая Вселенную, могла бы оказывать предполагаемое влияние. Если его идеи верны, то тогда как далёкие звёзды и соседний дом могут вносить свой вклад в ощущение того, что вы вращаетесь, когда вы вращаетесь? Без определения физического механизма, реализующего предположение Маха, трудно было исследовать идеи Маха сколько-нибудь точно.

С нашей современной точки зрения разумно предположить, что какое-то отношение к тому влиянию окружающей материи, которое связано с предположением Маха, может иметь гравитация. В последующие десятилетия эта возможность приковала внимание Эйнштейна, и при разработке собственной теории гравитации — общей теории относительности — он в значительной степени вдохновлялся предположением Маха. Когда наконец-то осела пыль вокруг теории относительности, то вопрос о том, является ли пространство чем-то реальным (или какая точка зрения верна: абсолютная или реляционная) был трансформирован таким образом, что упразднил все предыдущие точки зрения на Вселенную.

Глава 3. Относительность и абсолют Пространство-время — это абстракция Эйнштейна или физическая сущность?

Есть открытия, которые дают ответы на вопросы. Но есть другие открытия, которые оказываются столь глубоки, что ставят вопросы в совершенно новом свете, показывая, что предшествующие тайны неверно воспринимались из-за нехватки знания. Вы могли бы проводить своё время (и в античные времена некоторые так и поступали), гадая, что же произойдёт, когда вы достигнете края Земли, или пытаясь представить, кто или что живёт на обратной стороне плоской Земли. Но когда вы узнаете, что Земля круглая, вы поймёте, что эти загадки не решаются, они просто оказываются неуместными.

В течение первых десятилетий XX в. Альберт Эйнштейн сделал два глубоких открытия. Каждое из них вызвало радикальный переворот в нашем понимании пространства и времени. Эйнштейн разобрал жёсткие абсолютные структуры, сооружённые Ньютоном, и воздвиг собственную башню, объединив пространство и время совершенно неожиданным образом. Когда это было сделано, время *столь тесно* переплелось с пространством, что уже стало невозможным одно рассматривать отдельно от другого. Так что в третьем десятилетии XX в. вопрос о субстанциональности пространства изжил сам себя; в постановке Эйнштейна, о которой мы вскоре поговорим, его сменил следующий вопрос: является ли *пространство-время* чем-то реальным? Кажется, что вопрос лишь чуть модифицировался, но наше понимание арены реальности полностью трансформировалось.

Пусто ли пустое пространство?

Свет был главным действующим лицом в драме относительности, написанной Эйнштейном в начале XX в. И подмостки для постановки Эйнштейна установила работа Джеймса Клерка Максвелла. В середине XIX в. Максвелл написал четыре уравнения, которые впервые дали точную теоретическую базу для понимания электричества и магнетизма, а также их тесной взаимосвязи.^[17] Максвелл вывел эти уравнения, тщательно изучив работу английского физика Майкла Фарадея, который в начале 1800-х гг.

провёл десятки тысяч экспериментов и выявил неизвестные до того времени свойства электричества и магнетизма. Главным достижением Фарадея было введение концепции *поля*. Эта концепция, развитая позднее Максвеллом и многими другими учёными, оказала громадное влияние на развитие физики в последние два столетия; с помощью этой концепции объясняется множество маленьких загадок, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни. Каким образом металлоискатель в аэропорту, не касаясь вас, определяет, несёте ли вы с собой металлические предметы? Каким образом магнитно-резонансный томограф (МРТ), не проникая в ваше тело, даёт детальную картину того, что у вас внутри? Почему стрелка компаса всегда указывает точно на север? Обычный ответ на последний вопрос даётся с помощью представления о магнитном поле Земли, и та же концепция магнитного поля помогает объяснить первые два примера.

Я никогда не видел лучшей иллюстрации магнитного поля, чем на лабораторной работе в школе, когда железные опилки рассыпаются вокруг стержнеобразного магнита. После небольшого встряхивания опилки выстраиваются упорядоченным образом, образуя дуги, соединяющие северный и южный полюса магнита, как на рис. 3.1. Линии, вдоль которых выстраиваются железные опилки, служат прямым доказательством того, что магнит создаёт невидимое что-то, что пронизывает пространство вокруг него — что-то, что может, например, воздействовать силой на кусочки металла. Это невидимое что-то есть магнитное поле, которое, в соответствии с нашей интуицией, напоминает туман или некий дух, который может заполнять область пространства вокруг магнита и благодаря этому передавать силовое воздействие за пределы физического протяжения самого магнита. То, что магнитное поле даёт магниту, можно сравнить с тем, что армия даёт диктатору, а аудиторы — налоговой службе: влияние за пределами физических границ, что позволяет прикладывать силу в «поле». Вот почему магнитное поле называют также силовым полем.

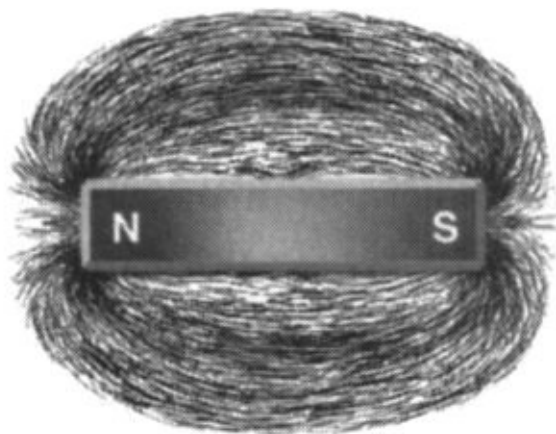


Рис. 3.1. Железные опилки, выстраивающиеся вокруг стержнеобразного магнита, прорисовывают его магнитное поле

Именно это свойство проникновения и распространения в пространстве делает магнитное поле столь полезным. Магнитное поле металлоискателя в аэропорту проникает сквозь вашу одежду и заставляет металлические предметы испускать собственные магнитные поля, которые и обнаруживаются детектором, и вы слышите звуковой сигнал, оповещающий об этом. Магнитное поле МРТ проникает в ваше тело, заставляя атомы вращаться так, чтобы они генерировали собственные магнитные поля, которые затем регистрируются прибором и перекодируются в картину внутренних тканей. Магнитное поле Земли проникает в компас, вынуждая его стрелку поворачиваться вдоль магнитных силовых линий, которые в результате тысячелетних геофизических процессов оказались ориентированы приблизительно в направлении с юга на север.

Магнитное поле представляет собой один широко распространённый тип поля, но Фарадей исследовал и другой тип: *электрическое поле*. Это поле вызывает потрескивание вашего шерстяного свитера и бьёт по вашей руке, когда вы, пройдя по ковру, прикасаетесь к металлической ручке двери, а также покалывает вашу кожу, если вы находитесь высоко в горах во время грозы. И если во время такой грозы вы станете следить за стрелкой компаса, то уловите зависимость между внезапными отклонениями стрелки компаса и вспышками бушующих неподалёку молний. Эта зависимость указывает на тесную взаимосвязь между электрическим и магнитным полями, которая была открыта датским физиком Хансом Эрстедом и затем тщательно исследована Майклом

Фарадеем в ходе дотошных экспериментов. Подобно тому как изменения на фондовой бирже могут влиять на рынок облигаций, который в свою очередь может влиять на фондовую биржу и т. д., так и изменения электрического поля могут индуцировать магнитное поле, которое в свою очередь может влиять на электрическое поле и т. д. Максвелл нашёл точную математическую формулировку взаимосвязи электрического и магнитного полей, и поскольку его уравнения показали, что эти поля столь же переплетены, как дреды растафари^[9], то их окрестили *электромагнитными* полями, а их воздействие — *электромагнитной* силой.

Сегодня мы постоянно погружены в океан электромагнитных полей. Ваш сотовый телефон и автомобильное радио работают на огромных пространствах благодаря вседесущему проникновению электромагнитных полей, излучаемых оборудованием операторов сотовой связи и передатчиками радиостанций. То же самое относится к беспроводному доступу в Интернет: компьютер может погружаться во Всемирную паутину благодаря электромагнитным полям, проникающим повсюду вокруг нас и, в том числе, сквозь нас. Конечно, во времена Максвелла технологии, использующие электромагнитные поля, были не столь развиты, но физики вполне оценили подвиг Максвелла: на языке полей Максвелл показал, что электричество и магнетизм, изначально считавшиеся различными явлениями, на самом деле являются разными проявлениями одной и той же физической сущности.

Позднее мы познакомимся с полями другого рода — гравитационными, ядерными, полями Хиггса и т. д. — и будет становиться всё яснее, что концепция поля занимает центральное место в современной формулировке физических законов. Но следующий важный шаг в нашей истории связан опять с Максвеллом. Анализируя свои уравнения, Максвелл обнаружил, что изменения или возмущения электромагнитного поля распространяются в виде волн с вполне определённой и фиксированной скоростью: 300 тыс. км/с в вакууме. И поскольку эта величина в точности совпала со скоростью света в вакууме, то Максвелл заключил, что свет должен быть ничем иным, как электромагнитной волной, взаимодействующей особым образом с химическими реагентами сетчатки глаза и, тем самым, дающей нам ощущение зрения. Это достижение ещё более подняло важность открытий Максвелла: он связал вместе силу магнитов, влияние электрических зарядов и свет, благодаря которому мы видим Вселенную. Но здесь же встал и следующий глубокий вопрос.

Когда мы говорим, что скорость света составляет 300 тыс. км/с, то

опыт и проведённое выше обсуждение учит нас, что это утверждение бессмысленно, пока мы не укажем, по отношению к *чему* измерена эта скорость. Забавно то, что уравнения Максвелла просто дают эту величину, 300 тыс. км/с, не указывая систему отсчёта, по отношению к которой получается такая скорость. Это так же сбивает с толку, как если бы кто-то назначил вам встречу на расстоянии 50 км к северу, не указав, к северу от *чего*. Большинство физиков, включая самого Максвелла, пытались следующим образом интерпретировать скорость, получающуюся из его уравнений. Известные нам волны, такие как океанские или звуковые, переносятся субстанцией, средой. Океанские волны переносятся водой. Звуковые волны переносятся воздухом. И скорости этих волн устанавливаются *по отношению к их среде распространения*. Когда мы говорим, что скорость звука при комнатной температуре составляет 340 м/с (что соответствует числу Маха, равному единице, — это число названо в честь Эрнста Маха, упомянутого ранее), мы подразумеваем, что звуковые волны с этой скоростью распространяются по неподвижному воздуху. Так что физики естественным образом предположили, что световые волны (электромагнитные волны) должны распространяться также в своей среде, которую ещё никто не видел и никогда не обнаруживал, но которая должна существовать. Для того чтобы обозначить существование этой среды, она была названа *светоносным эфиром* или просто *эфиром*; последний термин был введён Аристотелем ещё во времена античности для описания воображаемой магической субстанции, из которой состоят небесные тела. И чтобы соотнести эту гипотезу с результатами Максвелла, было выдвинуто предположение, что в его уравнениях неявно заложена система отсчёта, связанная с эфиром. Таким образом, скорость 300 тыс. км/с, даваемая уравнениями Максвелла, является скоростью света по отношению к неподвижному эфиру.

Как видно, возникает поразительная аналогия между светоносным эфиром и абсолютным пространством Ньютона. Обе эти гипотезы возникли в попытке дать систему отсчёта для определения движения; ускоренное движение привело к концепции абсолютного пространства, а распространение света привело к понятию светоносного эфира. Фактически, многие физики рассматривали эфир как земное отражение божественного духа, который, по мнению Генри Мора, Ньютона и других, пронизывает абсолютное пространство. (Ньютон и многие его современники даже использовали термин «эфир» при описании абсолютного пространства.) Но что в действительности представляет собой этот эфир? Из чего он состоит? Откуда взялся? Существует ли он везде?

Те же вопросы, которые оказались связаны с эфиром, столетиями ставились по отношению к абсолютному пространству. Но тогда как для реализации эксперимента Маха в отношении абсолютного пространства требуется вращение в совершенно пустой Вселенной, физики могли предложить вполне реальные эксперименты для определения, существует ли в действительности эфир. Например, если вы плывёте навстречу волне, то она быстрее настигает вас; если же вы уплываете от волны, то она медленнее приближается к вам. Аналогично, если вы двигаетесь по предполагаемому эфиру навстречу световой волне или от неё, то скорость приближения к вам световой волны должна быть больше или меньше величины 300 тыс. км/с. Но в 1887 г. Альберт Майкельсон и Эдвард Морли, неоднократно измеряя скорость света, всякий раз обнаруживали, что она в точности равна 300 тыс. км/с *независимо от движения экспериментальной установки или движения источника света*. Для объяснения этого результата приводились всевозможные хитроумные доводы. Некоторые считали, что экспериментальная установка, быть может, невольно увлекала за собой эфир в ходе проведения экспериментов. Другие предполагали, что само оборудование как-то деформировалось при движении через эфир, что приводило к искажению результатов измерений. Но только после революционного прозрения Эйнштейна объяснение стало окончательно ясным.

Относительное пространство, относительное время

В июне 1905 г. Эйнштейн написал статью с неприязнительным названием «К электродинамике движущихся тел», раз и навсегда положившую конец концепции светоносного эфира. Одним махом она навсегда изменила и наши представления о пространстве и времени. Идеи, предложенные в этой статье, были сформулированы Эйнштейном в течение пяти недель интенсивной работы в апреле-мае 1905 г., но вопросы, на которые он дал ответ, волновали его до этого более десятилетия. Ещё будучи подростком, Эйнштейн задавался вопросом, как будет выглядеть световая волна, если догонять её точно со скоростью света. Поскольку и вы, и световая волна двигаетесь по эфиру с одной и той же скоростью, то вы должны шагать со светом в ногу. И поэтому, заключил Эйнштейн, с вашей точки зрения свет должен выглядеть как неподвижный. Вы должны иметь возможность зачерпнуть пригоршню неподвижного света, подобно тому как вы можете зачерпнуть горсть свежавыпавшего снега.

Но вот в чём проблема. Уравнения Максвелла не разрешают свету быть покоящимся — выглядеть так, как будто он неподвижен. И, конечно, никому и никогда не удавалось взять в руки неподвижный комок света. «Так что же делать с этим очевидным парадоксом?» — спрашивал себя Эйнштейн, будучи подростком.

Десять лет спустя Эйнштейн дал миру ответ на этот вопрос в виде своей специальной теории относительности. Было множество дебатов, касающихся интеллектуальных корней открытия Эйнштейна, но решающую роль, несомненно, сыграла его непоколебимая вера в простоту решения. Эйнштейн был осведомлён по крайней мере о нескольких экспериментах, в которых не удалось получить свидетельства в пользу существования эфира.^[18] Так к чему же плясать вокруг эфира, пытаясь отыскать недочёты экспериментов? Вместо этого, предложил Эйнштейн, будем исходить из простого утверждения: эксперименты не смогли обнаружить эфир, потому что эфир не существует. И поскольку уравнения Максвелла, описывая распространение света (электромагнитных волн), не предполагают никакой светонесущей среды, то теория и эксперимент приходят к одному выводу: свету, в отличие от волн другого рода, не требуется среда для своего распространения. Свет — одинокий путешественник. Свет может распространяться в пустом пространстве.

Но что же тогда делать с уравнениями Максвелла, дающими скорость света 300 тыс. км/с? Если нет эфира в качестве стандарта состояния покоя, то *по отношению к чему* получается такая скорость? Эйнштейн опять порвал с традицией и ответил с предельной простотой. Если теория Максвелла не выделяет какого-либо стандарта покоя, то проще всего предположить, что он и не требуется. *Скорость света*, — декларировал Эйнштейн, — *равна 300 тыс. км/с относительно всего*.

Это действительно простое утверждение; оно прекрасно вписывается в максимум, часто приписываемую Эйнштейну: «Сделайте всё настолько просто, насколько это возможно, но не проще». Проблема в том, что это утверждение тоже выглядит безумным. Если вы бежите за удаляющимся лучом света, то здравый смысл говорит вам, что по отношению к вам свет должен удаляться со скоростью, меньшей 300 тыс. км/с. Если же вы бежите навстречу приближающемуся лучу света, то здравый смысл говорит вам, что по отношению к вам свет должен приближаться со скоростью, большей 300 тыс. км/с. В течение всей своей жизни Эйнштейн бросал вызов общепринятому здравому смыслу, и этот раз не явился исключением. Он с уверенностью настаивал, что независимо от того, насколько быстро вы приближаетесь к лучу света или удаляетесь от него, скорость луча с вашей

точки зрения всегда будет составлять 300 тыс. км/с, не больше, не меньше, — независимо ни от чего. Это определённо разрешало парадокс, поразивший Эйнштейна, когда он был ещё подростком: теория Максвелла не позволяет свету находиться в покое, потому что свет *никогда* не покоится; независимо от того, двигаетесь вы сами или покоитесь, свет всегда распространяется по отношению к вам с неизменной скоростью 300 тыс. км/с. Но тут же возникает естественный вопрос: как свет может вести себя таким странным образом?

Задумаемся немного о скорости. Скорость вычисляется так: пройденное расстояние делится на затраченное время. То есть это мера длины (пройденное расстояние), делённая на меру времени (затраченное время). Ещё со времён Ньютона пространство считалось абсолютным, существующим «безотносительно к чему-либо внешнему». Поэтому и измерения пространства и расстояний тоже должны быть абсолютными: кто бы ни проводил измерение расстояния между двумя объектами, в результате должна получаться одна и та же величина (если, конечно, измерения проводятся достаточно тщательно). И, хотя мы до сих пор и не говорили об этом прямо, то же самое Ньютон утверждал и по отношению к времени. Его описание времени в «Началах» вторит его описанию пространства: «время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно».^[10] Иными словами, согласно Ньютону, существует универсальная, абсолютная концепция времени, которая применима всегда и везде. В ньютоновской Вселенной получается так: кто бы ни измерял время, прошедшее между двумя событиями, в результате должна получаться одна и та же величина (если измерения проводятся достаточно точно).

Эти представления о пространстве и времени согласуются с нашим повседневным опытом и, опираясь на здравый смысл, позволяют нам заключить, что по отношению к нам луч света должен двигаться медленнее, если мы догоняем его. Проведём такой мысленный эксперимент. Представьте себе Барта, который только что получил новенький скейтборд с атомным двигателем и по этому случаю решил посоревноваться со светом. И хотя Барт немного разочарован тем, что максимальная скорость скейтборда только 250 тыс. км/с, он не намерен сдаваться и собирается выжать из своего скейтборда всё возможное. Его сестра Лиза встала наготове с лазером; она начинает вести обратный отсчёт от 11 (это любимое число её кумира Шопенгауэра) и когда достигает «0», Барт и лазерный луч срываются с места. Что видит Лиза? Она видит, что за каждую секунду свет покрывает 300 тыс. км, тогда как Барт только 250 тыс.

км, так что Лиза справедливо заключает, что свет удаляется от Барта со скоростью 50 тыс. км/с. Теперь вспомним о Ньюtone. Из его идей следует, что наблюдения Лизы над пространством и временем абсолютны и универсальны в том смысле, что к тому же заключению должен прийти каждый, кто бы ни проводил эти измерения. Согласно Ньютону, это столь же объективно, как «дважды два — четыре». Значит, согласно Ньютону, Барт должен согласиться с Лизой и сказать, что свет удалялся от него со скоростью 50 тыс. км/с.

Но по возвращению с гонки Барт вовсе с этим не согласен. Он уныло говорит, что как он ни старался — независимо от того, насколько сильно гнал он свой скейтборд, — он видел, что свет удалялся от него со скоростью 300 тыс. км/с, ничуть не меньше.^{19} И если вы по какой-либо причине не доверяете Барту, вспомните, что тысячи проведённых за последнюю сотню лет тщательных экспериментов, в которых измерялась скорость света с использованием движущихся источников и приёмников, в точности согласуются с наблюдениями Барта.

Как такое может быть?

Эйнштейн разгадал эту загадку, и его ответ не только логичен, но и позволяет существенно расширить рамки нашего обсуждения. Результаты измерений расстояний и промежутков времени, полученные Бартом, которые он использует для вычисления скорости, отличаются от результатов измерений Лизы. Задумайтесь над этим. Поскольку скорость есть не что иное, как расстояние, делённое на время, то невозможно никак иначе объяснить расхождение в оценке скорости удаления света с точек зрения Барта и Лизы. Поэтому, заключил Эйнштейн, ньютоновская идея абсолютного пространства и абсолютного времени неверна. Эйнштейн понял, что экспериментаторы, движущиеся друг относительно друга (такие как Барт и Лиза), не получают идентичных результатов при измерении расстояний и промежутков времени. Загадочные экспериментальные данные, касающиеся скорости света, могут быть объяснены только в том случае, если восприятия пространства и времени у движущихся друг относительно друга наблюдателей отличаются.

Изошрён, но не злонамерен

Относительность пространства и времени — потрясающий вывод. Я знаю об этом более двадцати пяти лет, но даже сейчас, когда я спокойно сижу и размышляю над этим, я изумляюсь. Из банального утверждения о

постоянстве скорости света мы приходим к выводу, что *пространство и время зависят от наблюдателя*. С каждым из нас связаны собственные часы, свой монитор течения времени. Часы каждого из нас точны, и всё же они показывают разное время, когда мы двигаемся друг относительно друга. Они перестают быть синхронными; они показывают различное время, прошедшее между двумя данными событиями. То же самое относится и к расстоянию. С каждым из нас связана собственная линейка, свой монитор пространственных промежутков. Все линейки точны, и всё же они не согласуются, когда мы двигаемся друг относительно друга; они дают разное расстояние между положениями двух заданных событий. Если бы пространство и время не вели себя таким образом, то скорость света не была бы постоянной и зависела бы от состояния движения наблюдателя. Но скорость света *действительно* постоянна; пространство и время *действительно* относительны. Пространство и время «подстраиваются» под наблюдателя таким образом, что для всех наблюдателей, независимо от скорости их движения, скорость света остаётся одной и той же.

Получить количественные данные, как в точности результаты измерений пространства и времени зависят от движения, несколько сложнее, однако эти алгебраические выкладки вполне под силу старшеклассникам. Отнюдь не математические сложности делают специальную теорию относительности Эйнштейна нелёгкой для понимания. Эта теория трудна из-за того, что её идеи чужды нашему повседневному опыту и выглядят явно не согласующимися с ним. Но как только Эйнштейн осознал, что необходимо порвать с более чем двухсотлетними ньютоновскими представлениями о пространстве и времени, дальнейшее было уже гораздо проще. Эйнштейн смог показать, как в точности результаты измерений расстояний и промежутков времени должны зависеть от скорости наблюдателя, чтобы любой наблюдатель получал одну и ту же скорость света.^[20]

Чтобы лучше понять то, что открыл Эйнштейн, представим, что Барт, скрипя зубами, выполнил требование снять атомный двигатель со своего скейтборда, и сейчас его максимальная скорость составляет 120 км/ч. Если с этой скоростью он направится сначала строго на север, а затем свернёт на трассу, идущую на северо-восток, то его скорость в северном направлении станет *меньше* 120 км/ч. Причина этого ясна. Первоначально вся скорость была «приложена» к северному направлению, но после того как Барт свернул на другую трассу, часть его скорости «отвлекается» на восточное направление, так что скорость движения на север уменьшается. Это очень простое соображение позволит нам ухватить основное положение

специальной теории относительности. Вот что получается:

Мы привыкли к тому, что объекты могут двигаться в пространстве, но ведь есть и другой, не менее важный тип движения — движение во времени. Часы у вас на руке и ходики на стене тикают, неумолимо показывая, что вы и всё вокруг вас беспрестанно движется во времени, секунда за секундой. Ньютон считал, что движение во времени полностью отделено от движения в пространстве, — он думал, что эти два типа движения не имеют ничего общего друг с другом. Но Эйнштейн открыл, что они связаны между собой самым тесным образом. В действительности, *революционное* открытие специальной теории относительности состоит в следующем: когда вы смотрите на объект, который с вашей точки зрения покоится (например, припаркованный автомобиль), он не двигается только в пространстве, и всё его движение происходит во времени. Автомобиль, водитель, улица, вы сами, ваша одежда — всё движется во времени совершенно синхронным образом, секунда за секундой. Но если автомобиль набирает скорость, то часть его движения во времени *переводится* в движение в пространстве. И подобно тому как скорость Барта в северном направлении уменьшилась, после того как он перевёл некоторую часть скорости на восточное направление, то и скорость автомобиля во времени замедляется, когда он переводит часть своего движения во времени в движение в пространстве. Это означает, что *время течёт медленнее для движущегося автомобиля и его водителя по сравнению с ходом времени неподвижных объектов*.

В этом, в двух словах, и состоит суть теории относительности. Подчеркнём ещё только одну важную деталь — ограничение скорости, составившее в случае Барта величину 120 км/ч. Это ограничение действительно важно, ведь в противном случае Барт мог бы увеличить скорость своего скейтборда после поворота на север-восток, и тем самым он бы компенсировал потерю скорости в северном направлении. Но правила есть правила: полная скорость движения, состоящего из движений в северном и восточном направлении, не должна превышать 120 км/ч. Так что, отклоняясь хотя бы чуть-чуть на восток, Барт неизбежно теряет скорость в северном направлении.

Специальная теория относительности устанавливает аналогичный закон для всего движения: *полная скорость движения любого объекта в пространстве и во времени всегда в точности равна скорости света*. Сначала вы можете инстинктивно отшатнуться от этого утверждения, поскольку мы приучены к положению, что только свет может путешествовать со скоростью света. Но *эта обычная идея относится*

только к движению в пространстве. Теперь же мы говорим о чём-то похожем, но более богатом: о *полном* движении объекта в пространстве-времени. Ключевой факт, открытый Эйнштейном, состоит в том, что эти два типа движения всегда дополнительны по отношению друг к другу. Когда припаркованный автомобиль отъезжает со стоянки, часть его движения со скоростью света перенаправляется из движения только во времени в движение в пространстве, но при этом *полная скорость остаётся неизменной*. Такое перераспределение неизбежно означает замедление движения автомобиля во времени.

В качестве примера, если бы Лиза смогла увидеть часы Барта, несущегося со скоростью 250 тыс. км/с, то она бы отметила, что скорость тиканья его часов составляет примерно три четверти от скорости тиканья её собственных часов. Иными словами, за каждые четыре часа по часам Лизы проходит только три часа по часам Барта. Таким образом, скорость движения Барта в пространстве столь велика, что она значительно сказывается на его скорости движения во времени.

Более того, максимальная скорость движения в пространстве достигается тогда, когда всё движение со скоростью света во времени переводится в движение со скоростью света в пространстве — вот ещё одна иллюстрация того, почему при движении в пространстве невозможно развить скорость, превышающую скорость света. Свет, распространяющийся всегда со скоростью света, уникален как раз тем, что у него происходит полный перевод всего движения в движение в пространстве. И подобно тому как при движении автомобиля строго на восток он нисколько не смещается в северном направлении, так и движение в пространстве со скоростью света ничего не оставляет на движение во времени! Время останавливается при движении в пространстве со скоростью света. Часы фотонов вообще не тикают. Свет реализует мечту Понсе де Леона^[11] и всей индустрии косметики: он не стареет.^[21]

Нетрудно понять, что эффекты специальной теории относительности наиболее ярко выражены, когда скорость движения в пространстве составляет ощутимую часть от скорости света. Но эта непривычная нам взаимно дополнительная природа движения в пространстве и времени существует всегда и никогда не исчезает. Чем меньше скорость, тем меньше отклонения от дорелятивистской физики — от здравого смысла, — но, будьте уверены, отклонения всегда есть.

Это не ловкость рук и не психологическая иллюзия. Так устроена Вселенная.

В 1971 г. в эксперименте Джозефа Хафеле и Ричард Китинга

сверхточные цезиевые атомные часы облетели вокруг Земли на коммерческом реактивном самолёте Пан Американ. Когда они сверили показания часов, летавших на самолёте, с показаниями идентичных часов, оставленных на земле, то обнаружили, что полетавшие часы отмерили меньшее время. Разница была крошечной — несколько сотен миллиардных долей секунды, — но в точном соответствии с теорией Эйнштейна. Чего же ещё хотеть в обычных условиях?

В 1908 г. прошёл слух^[12], что в новых, более тонких экспериментах доказано существование эфира.^[22] Будь это так, это означало бы, что существует абсолютный стандарт покоя, и специальная теория относительности Эйнштейна неверна. Эйнштейн отреагировал на эту молву фразой: «Бог изощрён, но не злонамерен». Проникновение Эйнштейна в природу пространства и времени было куда более глубоким, чем кто-либо смог достичь до него. И допустить существование такой изумительно красивой теории, не имеющей, однако, никакого отношения к устройству Вселенной, было бы злонамеренностью. Эйнштейн даже не стал смотреть на новые эксперименты, и его уверенность оправдала себя. В конце концов было показано, что эти эксперименты ошибочны, и светоносный эфир испарился со сцены науки.^[13]

А как насчёт ведра?

Теперь со светом определённо всё в порядке. Теория и эксперимент согласуются в том, что для распространения световых волн не требуется никакая среда, и независимо от движения источника света или наблюдателя скорость света всегда постоянна и неизменна. Любая точка зрения равноценна другой. Не существует абсолютной или предпочтительной системы отсчёта для определения покоя. Всё очень хорошо. А как насчёт ведра?

Вспомним, что хотя многие и рассматривали светоносный эфир в качестве физической субстанции, оправдывающей введение ньютоновского абсолютного пространства, но эфир никак не связан с тем, *почему* Ньютон ввёл абсолютное пространство. Рассматривая ускоренное движение, такое как вращение ведра, Ньютон не нашёл другого выхода, кроме как ввести некую невидимую субстанцию, по отношению к которой можно однозначно определить движение. Покончив с эфиром, мы не покончили с ведром; так как же Эйнштейн и его специальная теория относительности справились с этой проблемой?

По правде говоря, в своей специальной теории относительности Эйнштейн сосредоточился на особом виде движения: на движении с постоянной скоростью. И лишь десять лет спустя, в 1915 г., в своей общей теории относительности он охватил более общее, ускоренное движение. Но и до этого Эйнштейн и другие учёные постоянно возвращались к вопросу о вращательном движении, применяя идеи специальной теории относительности; они приходили к выводу Ньютона, не соглашаясь с Махом: даже в совершенно пустой Вселенной вы бы почувствовали силу вращения — Гомер чувствовал бы себя придавленным ко внутренней поверхности вращающегося ведра; натянулась бы верёвка, связывающая два вращающихся камня.^[23] Покончив с концепцией Ньютона об абсолютном пространстве и абсолютном времени, как Эйнштейн объяснил это?

Ответ неожиданный. Несмотря на своё название, теория Эйнштейна не заявляет, что всё относительно. Специальная теория относительности в действительности утверждает, что *некоторые* понятия относительны: скорости относительны, расстояния пространства относительны, промежутки времени относительны. Но эта теория на самом деле вводит новую всеобъемлющую абсолютную концепцию: *абсолютное пространство-время*. Абсолютное пространство-время столь же абсолютно в специальной теории относительности, как абсолютное пространство и абсолютное время были абсолютны для Ньютона; и отчасти по этой причине Эйнштейн предпочитал не называть эту свою теорию «теорией относительности». Вместо этого он и другие физики склонялись к термину «теория инвариантности», подчёркивая, что в своей основе теория включает нечто, с чем все согласны, нечто, что не относительно.^[24]

Абсолютное пространство-время — это следующая важная глава в истории с ведром, поскольку даже при отсутствии всех материальных ориентиров для определения движения абсолютное пространство-время специальной теории относительности даёт нечто, по отношению к чему можно определить ускоренное движение.

Нарезая пространство и время

Чтобы увидеть это, вообразим, что Мардж и Лиза в поисках приятного и полезного совместного времяпрепровождения решили пойти на курсы благоустройства городов в институте Бёрнса. В качестве первого задания их попросили перепланировать улицы и авеню Спрингфилда^[14], учитывая

два требования: 1) улицы и авеню должны быть проложены так, чтобы Парящий ядерный монумент оказался бы точно в центре, на пересечении 5-й улицы с 5-й авеню и 2) улицы и авеню должны идти строго перпендикулярно друг другу и иметь одинаковую длину 100 м. Прямо перед занятиями Лиза и Мардж сравнили свои планы и обнаружили, что что-то совсем не так. Расположив Ядерный монумент в центре города, как и положено, Мардж обнаруживает, что супермаркет «На скорую руку» в её проекте попал на пересечение 8-й улицы с 5-й авеню, а атомная электростанция оказалась на пересечении 3-й улицы с 5-й авеню, как показано на рис. 3.2а. Но в проекте Лизы адреса этих объектов совсем другие: супермаркет «На скорую руку» находится на пересечении 7-й улицы и 3-й авеню, тогда как атомная электростанция расположилась на пересечении 4-й улицы и 7-й авеню, как показано на рис. 3.2б. Ясное дело, кто-то из них ошибся.

Но, немного поразмыслив, Лиза понимает, в чём дело. Никто не ошибся. Права и она, и Мардж. Они просто по-разному ориентировали сеть улиц и авеню. Улицы и авеню Мардж идут под углом к улицам и авеню Лизы; сети улиц и авеню можно совместить путём вращения относительно центра города; просто Лиза и Мардж по-разному «нарезали» Спрингфилд на улицы и авеню (см. рис. 3.2в). Отсюда простой, но важный урок. Есть свобода в том, как Спрингфилд — область пространства — может быть разбита на улицы и авеню. Нет «абсолютных» улиц или «абсолютных» авеню. Выбор Мардж столь же законен, как и выбор Лизы — как и любая другая ориентация сети улиц и авеню.

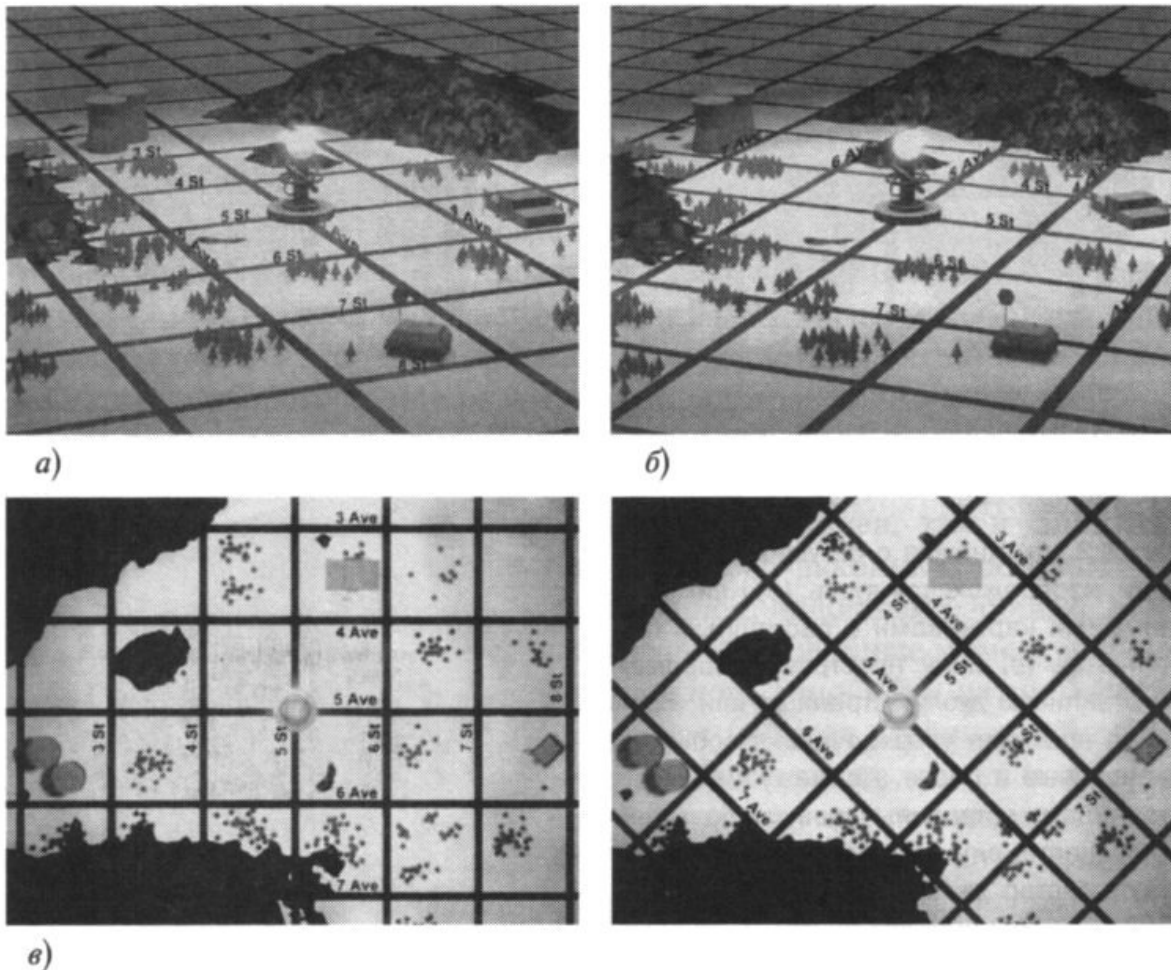
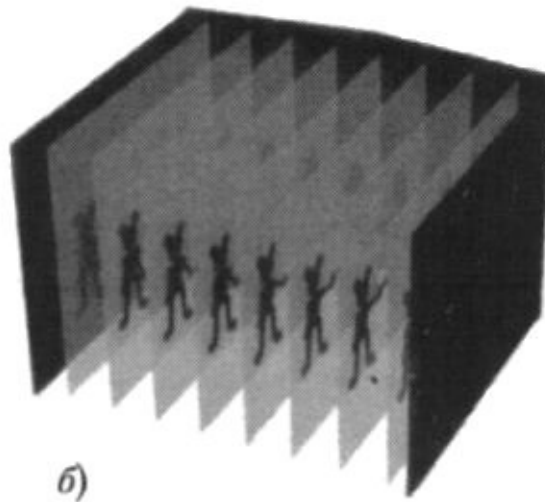
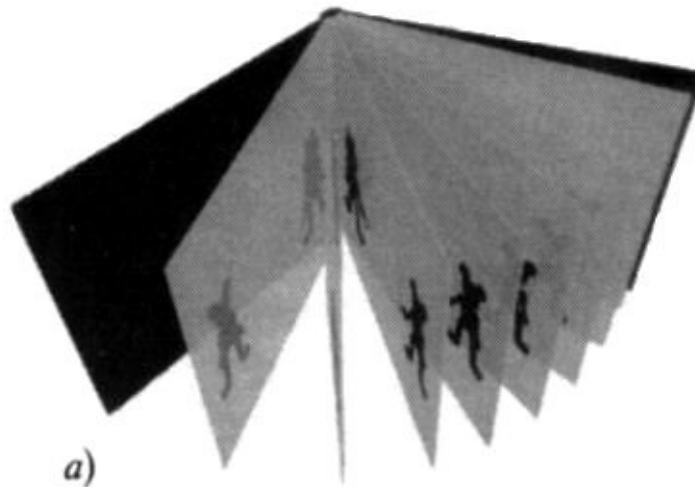


Рис. 3.2. (а) Проект Мардж. (б) Проект Лизы. (в) Вид сверху на проекты Мардж и Лизы. Их сети улиц и авеню можно совместить вращением относительно центра города

Помните это при добавлении времени к нашей картинке. Говоря об арене Вселенной, мы обычно имеем в виду только пространство, но физические процессы разворачиваются в области пространства *в течение некоторого промежутка времени*. В качестве примера представим себе, что между Щекоткой и Царапкой^[15] происходит дуэль, как показано на рис. 3.3а, и события записываются как на старинных книжках с бегущими картинками. Каждая страница является «срезом по времени» (как кадр на киноплёнке), показывающим, что происходило в фиксированный момент времени в рассматриваемой области пространства. Чтобы увидеть, что случилось в другой момент времени, нужно перелистнуть страницу.^[16] (Конечно, пространство трёхмерно, тогда как страницы двумерны, но

давайте примем такое упрощение, чтобы легче было думать и рисовать картинки. Это никак не повлияет ни на один вывод.) Введём следующую терминологию: область пространства, рассматриваемую в течение интервала времени, мы будем называть областью *пространства-времени*; вы можете думать об области пространства-времени как о записи всего, что происходит в некоторой области пространства в заданный промежуток времени.



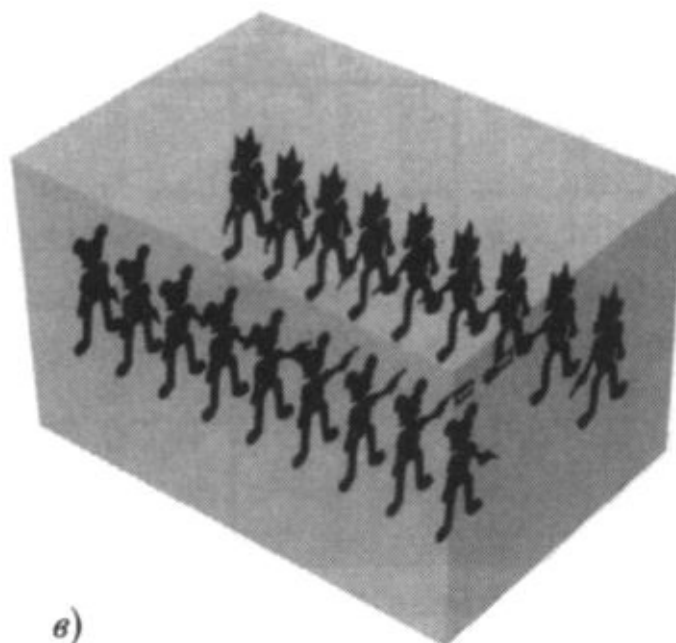


Рис. 3.3. (а) Книжка с бегущими картинками, изображающая дуэль. (б) Книжка с бегущими картинками с растянутым переплётом. (в) Блок пространства-времени с записью дуэли. Страницы или «срезы по времени» упорядочивают события, записанные в блоке. Промежутки между страницами оставлены лишь для большей наглядности; они не намекают на то, что пространство дискретно — этот вопрос мы обсудим позже

Теперь, следуя за математиком Германом Минковским (который, кстати, был преподавателем Эйнштейна и обозвал лентяем своего молодого студента), рассмотрим область пространства-времени как «вещь в себе». Приняв такую точку зрения, представим себе, что мы растянули переплёт нашей книжки (см. рис. 3.2б), и вообразим, что все её страницы совершенно прозрачны, так что, глядя на книжку, мы видим один непрерывный блок, содержащий все события, произошедшие в заданный промежуток времени. С этой точки зрения страницы книги следует считать лишь удобным способом организации содержимого блока, т. е. организации всех событий пространства-времени. Подобно тому как сеть улиц/авеню позволяет нам легко ориентироваться в городе по их номерам, так и деление блока пространства-времени на отдельные страницы позволяет нам легко ориентироваться в событиях (Щекотка выстреливает из пистолета, пуля попадает в Царапку и т. д.), указывая время, когда

произошло событие (т. е. страницу, на которой зафиксировано данное событие) и область пространства, в которой произошло событие.

И вот главный момент: подобно тому как Лиза поняла, что можно по-разному «нарезать» область пространства на улицы и авеню, причём каждый из этих способов будет одинаково законен, так и Эйнштейн осознал, что можно по-разному и одинаково законным образом «нарезать» область пространства-времени (блок, подобный изображённому на рис. 3.3в) на области пространства в фиксированные моменты времени. Страницы на рис. 3.3а–в отображают лишь один из множества возможных способов организации срезов (каждая страница относится к фиксированному моменту времени). Поначалу это может показаться лишь незначительным расширением того, что мы интуитивно знаем о пространстве, но это послужило базисом для переворота в некоторых интуитивных представлениях (из числа основных), существовавших в течение тысячелетий. До 1905 г. было «само собой разумеющимся», что все одинаково переживают ход времени, что все единодушны в том, какие события произошли в заданный момент времени, и, значит, все согласятся с тем, что именно запечатлено на такой-то странице книги пространства-времени. Но всё это изменилось, когда Эйнштейн открыл, что для двух наблюдателей, движущихся друг относительно друга, время течёт по-разному. Часы, двигающиеся друг относительно друга, перестают быть синхронными, и, следовательно, дают разное представление об одновременности. Каждая из страниц на рис. 3.3б отражает точку зрения лишь одного наблюдателя на то, что произошло в тот или иной момент *его* времени. Другой наблюдатель, движущийся по отношению к первому, заявит, что события, представленные на одной странице этой книги (рис. 3.3б), произошли *не* в одно и то же время.

Это факт известен как *относительность одновременности*. Остановимся подробнее на этом, вообразив, что Щекотка и Царапка с пистолетами в опущенных руках стоят друг напротив друга в противоположных концах вагона поезда, движущегося с постоянной скоростью. Один секундант наблюдает за дуэлью из поезда, а второй находится на платформе, мимо которой проезжает поезд. Чтобы сделать дуэль как можно более честной, все участники соглашаются отказаться от правила трёх шагов, и, вместо этого, дуэлянты будут стрелять по сигналу от вспышки кучки пороха, находящейся строго посередине между ними. Первый секундант, Апу^[17], поджигает фитиль, ведущий к кучке пороха и делает шаг назад. По вспышке пороха Щекотка и Царапка поднимают пистолеты и стреляют. Поскольку Щекотка и Царапка находятся на

одинаковом расстоянии от пороха, то Апу уверен, что свет от вспышки достиг дуэлянтов одновременно, так что он поднимает зелёный флаг, означающий, что дуэль прошла честно. Но второй секундант, Мартин, наблюдавший за дуэлью с платформы, заявляет о мошенничестве, утверждая, что световой сигнал от вспышки дошёл до Щекотки раньше, чем до Царапки. Он объясняет это тем, что Щекотка стоял в задней части вагона и двигался навстречу световому сигналу, тогда как Царапка удалялся от светового сигнала из-за движения поезда. Значит, чтобы достичь Щекотку, свету нужно было пройти меньшее расстояние, чем до Царапки, и, следовательно, Щекотка получил световой сигнал раньше Царапки, так что дуэль прошла нечестно.

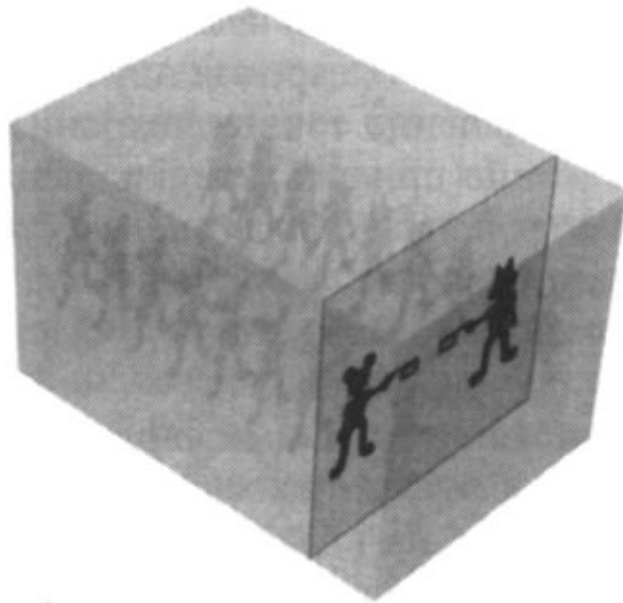
Кто же прав, Апу или Мартин? Эйнштейн даёт неожиданный ответ: правы оба. Хотя секунданты приходят к разным выводам, но наблюдения и рассуждения каждого из них безупречны. Как бита и бейсбольный мяч, они просто с разных точек зрения смотрят на одни и те же события. Самая удивительная вещь, которую открыл Эйнштейн, состоит в том, что различные точки зрения приводят к разным, но одинаково справедливым выводам о том, какие события произошли одновременно. Конечно, в нашей обычной повседневной жизни, как в примере с поездом, разница будет ничтожно мала — Мартин заявляет, что Царапка получил световой сигнал на триллионную долю секунды позже Щекотки, — но если бы поезд двигался быстрее, близко к скорости света, то разница во времени была бы значительной.

Задумавшись, как это отразится на нашей книжке с бегущими картинками, нарезающей на ломтики область пространства-времени. Поскольку наблюдатели,двигающиеся друг относительно друга, не согласны в том, какие события произошли одновременно, то не будут совпадать и страницы книжек, на которых запечатлеваются события, произошедшие одновременно с точки зрения каждого из наблюдателей. Таким образом, наблюдатели, движущиеся друг относительно друга, «нарезают» блок пространства-времени на страницы разными, но одинаково справедливыми способами. То, что Лиза и Мардж обнаружили по отношению к пространству, Эйнштейн нашёл по отношению к пространству-времени.

Срезы под разными углами

Можно расширить аналогию между сетью улиц/авеню и «срезов по

времени». Подобно тому как проекты Мардж и Лизы можно совместить друг с другом путём вращения, так и «срезы по времени» Апу и Мартина (страницы их книжек с бегущими картинками) можно совместить путём вращения, но вращения, включающего как пространство, так и время. Это иллюстрируется на рис. 3.4а и б, где видно, что «срезы по времени» Мартина повернуты по отношению к срезам Апу, из-за чего Мартин и заявил, что дуэль была проведена нечестно. Однако между этими случаями есть важное различие: в то время как угол вращения между планами Мардж и Лизы определяется выбором проектировщиков, угол вращения между срезами Апу и Мартина определяется скоростью их относительного движения. И нетрудно понять, почему это так.



a)

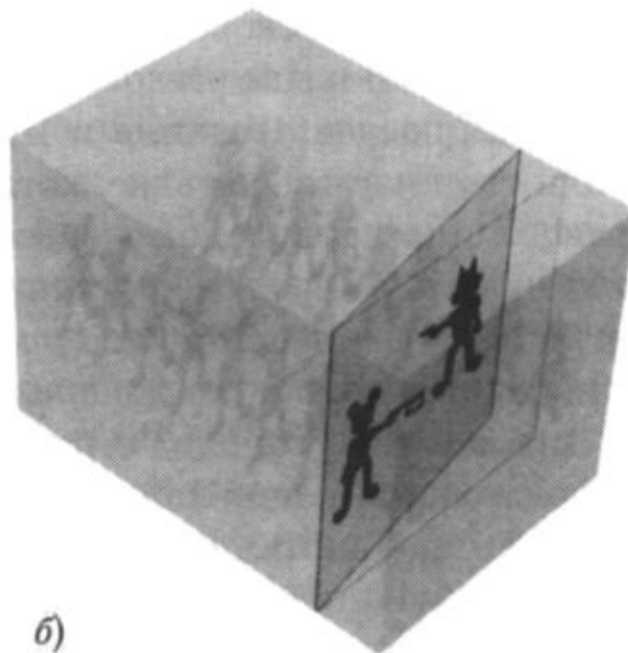


Рис. 3.4. «Срезы по времени» согласно Апу (а) и Мартину (б), движущихся относительно друг друга. Согласно Апу, находящемуся в поезде, дуэль проведена честно; согласно Мартину, стоящему на платформе, дуэль проведена нечестно. Обе точки зрения одинаково справедливы. На рис. б подчёркнута разница между углами срезов пространства-времени

Вообразим, что Щекотка и Царапка помирились. Вместо того чтобы стрелять друг в друга, они решили точно синхронизировать часы, идущие в передней и задней частях движущегося вагона. Поскольку они находятся на равном расстоянии от кучки пороха, то принимают следующий план. Каждый из них ставит свои часы ровно на 12:00, когда увидит свет от вспыхнувшего пороха. С их точки зрения, свет должен преодолеть одинаковое расстояние, чтобы достичь каждого из них, а поскольку скорость света постоянна, то он достигнет их одновременно. Но, как и раньше, Мартин, вместе со всеми, стоящими на платформе, заявит, что Щекотка едет навстречу испущенному свету, тогда как Царапка удаляется от него, и поэтому Щекотка получит световой сигнал чуть раньше Царапки. Так что наблюдатель на платформе (Мартин) придёт к выводу, что Щекотка установил свои часы на 12:00 *раньше* Царапки, и поэтому часы Щекотки будут чуть опережать часы Царапки. Например, с точки зрения Мартина, когда часы Щекотки показывают 12:06, на часах Царапки может быть

только 12:04 (точное расхождение зависит от длины вагона и скорости поезда: чем длиннее вагон и чем быстрее он движется, тем больше расхождение). И всё же, с точки зрения Апу и всех, едущих на поезде, Щекотка и Царапка совершенно точно синхронизировали свои часы. Опять же, хотя это и трудно принять с точки зрения здравого смысла, парадокса здесь нет: *наблюдатели, движущиеся друг относительно друга, не соглашаются по поводу одновременности — они не соглашаются друг с другом в вопросах о том, какие события происходят в одно и то же время.*

Это означает, что одна страница из книжки с бегущими картинками наблюдателей, едущих в поезде, содержит события, отражённые на *разных* страницах книжки наблюдателей, стоящих на платформе (с точки зрения наблюдателей с платформы Щекотка установил свои часы *раньше* Царапки, так что эти события отражены на разных страницах). Вот мы и подошли к самому главному. Любая страница книжки наблюдателей с поезда содержит события, отражённые на предшествующих и последующих страницах книжки наблюдателей с платформы. Вот почему «срезы по времени» Мартина и Апу на рис. 3.4 повернуты друг относительно друга: то, что с одной точки зрения лежит на одном срезе, пересекает множество срезов по времени с другой точки зрения.

Если бы была верна ньютоновская концепция абсолютного пространства и абсолютного времени, тогда все наблюдатели имели бы один и тот же способ нарезки пространства-времени. Каждый срез представлял бы абсолютное пространство, как оно выглядит в данный момент абсолютного времени. Но мир устроен не так, и переход от жёсткого ньютоновского времени к эйнштейновой гибкости полезно ещё раз проиллюстрировать на следующем примере. Вместо того чтобы представлять пространство-время в виде фиксированной книжки с бегущими картинками, подумайте о громадной буханке свежего хлеба. И вместо того чтобы представлять себе фиксированные страницы книги (фиксированные ньютоновские срезы по времени), подумайте о многообразии углов, под которыми можно нарезать хлеб, как на рис. 3.5а. Каждый ломтик хлеба представляет пространство в какой-то один момент времени с точки зрения соответствующего наблюдателя. Но другой наблюдатель, движущийся с постоянной скоростью относительно первого, нарежет буханку пространства-времени уже под другим углом, как это показано на рис. 3.5б. Чем больше относительная скорость движения наблюдателей, тем больше будет разница между «углами нарезки» соответствующих ломтиков (как разъяснено в примечании [\[25\]](#), предел скорости, установленный светом, означает, что существует максимальная

разница в углах, составляющая 45°) и тем больше будет различие в том, что разные наблюдатели считают одновременно произошедшими событиями.

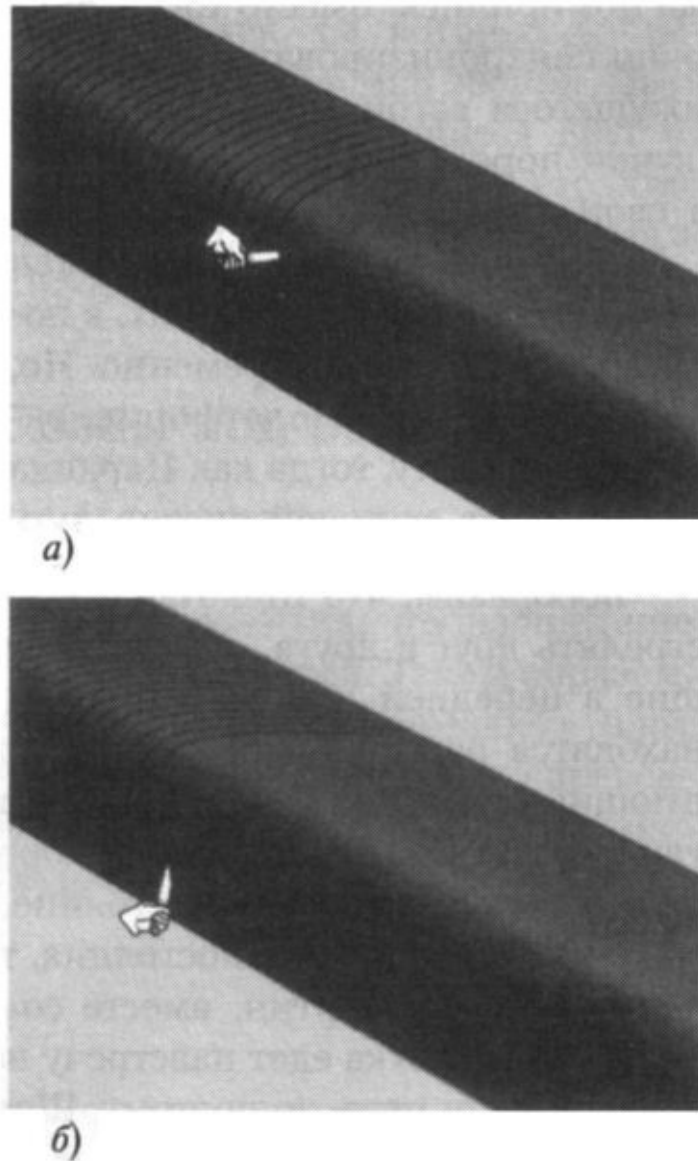


Рис. 3.5. Подобно тому как буханку хлеба можно нарезать под различными углами, так и «срезы по времени» блока пространства-времени идут под разными углами в зависимости от относительной скорости наблюдателя. Чем больше эта скорость, тем больше угол (максимум 45° при достижении скорости света)

Ведро с точки зрения специальной теории относительности

Относительность пространства и времени требует существенных изменений в нашем мышлении. Однако здесь есть один важный момент, упомянутый ранее и проиллюстрированный на примере буханки хлеба, но зачастую упускаемый: *не всё относительно в специальной теории относительности*. Даже если мы с вами захотим вообразить нарезку буханки хлеба разными способами, всё же есть кое-что, с чем мы полностью согласимся: буханка в целом одна и та же. Хотя кусочки хлеба будут отличаться, но если мы составим их вместе, то получим одну и ту же буханку, как бы мы её ни нарезали. Да и как могло бы быть иначе? Ведь мы нарезали одну и ту же буханку.

Аналогично, все «срезы» пространства в последовательные моменты времени (см. рис. 3.4) в совокупности дают один и тот же блок пространства-времени, с какой бы скоростью ни двигался наблюдатель. Различные наблюдатели «нарезают» блок пространства-времени различными способами, но сам блок, подобно буханке хлеба, имеет независимое существование. Таким образом, хотя Ньютон определённо был неправ, его утверждение о том, что существует нечто абсолютное, с чем согласится любой наблюдатель, не полностью развенчано в специальной теории относительности. Абсолютное пространство не существует. Абсолютное время не существует. Но, согласно специальной теории относительности, абсолютное пространство-время в действительности существует. Имея это наблюдение, давайте снова вернёмся к ньютоновскому ведру.

По отношению к чему вращается ведро в совершенно пустой Вселенной? Согласно Ньютону — по отношению к абсолютному пространству. Согласно Маху, в этом случае даже бессмысленно говорить о вращении ведра. Согласно специальной теории относительности Эйнштейна, ведро вращается по отношению к абсолютному пространству-времени.

Чтобы понять это, давайте снова взглянем на проекты благоустройства Спрингфилда. Вспомним, что на планах Мардж и Лизы как супермаркет «На скорую руку», так и атомная электростанция имеют разные адреса из-за того, что сети улиц и авеню на этих планах повернуты по отношению друг к другу. Но несмотря на разные сети улиц и авеню, кое-что на этих планах совпадает. Например, если для удобства работников атомной электростанции проложить асфальтированную дорожку прямо от их места работы к супермаркету «На скорую руку», то Мардж и Лиза не придут к согласию о том, какие улицы и авеню пересечёт эта дорожка, как видно по рис. 3.6. Но они наверняка согласятся по поводу *формы* дорожки: в обоих

случаях дорожка будет отрезком прямой линии. Геометрическая форма дорожки не зависит от ориентации сети улиц/авеню.

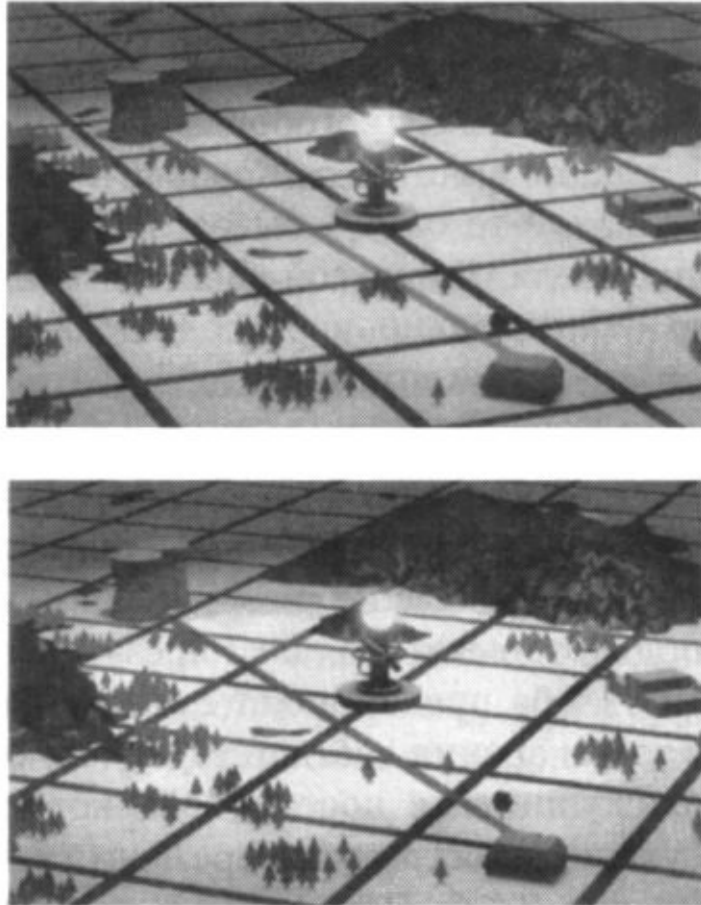


Рис. 3.6. Независимо от ориентации сети улиц/авеню все согласятся с тем, что проложенная дорожка является отрезком прямой линии

Эйнштейн понял, что нечто подобное справедливо по отношению к пространству-времени. Даже если два наблюдателя,двигающиеся друг относительно друга, «нарезают» пространство-время различными способами, кое в чём они всё же согласятся. В качестве первого примера рассмотрим траекторию движения в виде прямой линии, но не просто в пространстве, а в пространстве-времени. Хотя такая траектория менее привычна из-за введения времени, но после минутного размышления становится понятен её смысл. Чтобы траектория движения объекта в пространстве-времени была прямой линией, этот объект должен двигаться не только по прямой линии в пространстве, но и равномерно по времени;

иными словами, величина и направление скорости его движения должны быть неизменными, и, значит, объект должен двигаться с постоянной скоростью. Так вот, хотя разные наблюдатели «нарезают» блок пространства-времени под разными углами и поэтому не согласятся в том, за какое время пройден тот или иной участок траектории или какова его длина, но они, подобно Мардж и Лизе, согласятся в том, что эта траектория является прямой линией. Подобно тому как геометрическая форма дорожки от атомной электростанции к супермаркету «На скорую руку» не зависит от ориентации сети улиц/авеню, так и геометрические формы траекторий в пространстве-времени не зависят от способа организации временных слоёв. [\[26\]](#)

Это утверждение простое, но очень важное, поскольку благодаря ему специальная теория относительности даёт абсолютный критерий (с которым согласятся все наблюдатели, с какой бы постоянной скоростью они бы ни двигались) для определения ускоренного движения. Если траектория объекта в пространстве-времени является прямой линией, как у мирно покоящегося космонавта на рис. 3.7а, то объект не ускоряется. Если же траектория объекта в пространстве-времени описывает другую линию, отличную от прямой, то объект *ускоряется*. Например, если космонавт включит свой реактивный ранец и начнёт летать кругами, как на рис. 3.7б, или же понесётся в открытый космос, как на рис. 3.7в, то его траектория в пространстве-времени будет кривой линией — это неопровержимый знак ускорения. Таким образом, мы поняли, что *геометрические формы траекторий в пространстве-времени дают абсолютный критерий для определения ускоренного движения*. Пространство-время, но не пространство в отдельности, предоставляет такой критерий.

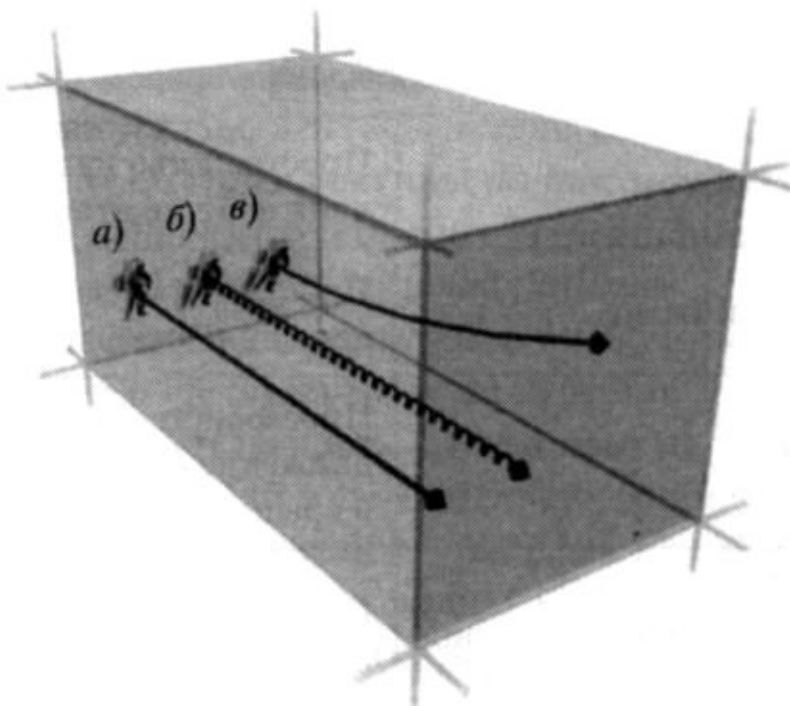


Рис. 3.7. Траектории трёх космонавтов в пространстве-времени. Космонавт (а) не ускоряется и поэтому описывает прямую линию в пространстве-времени. Космонавт (б) летает кругами, что отображается спиралью в пространстве-времени. Космонавт (в) ускоряется в открытый космос, поэтому его траектория в пространстве пошла по другой кривой линии

В этом смысле, следовательно, специальная теория относительности говорит нам, что само пространство-время является окончательным судьёй для определения ускоренного движения. Пространство-время предоставляет подмости, по отношению к которым можно говорить об ускоренном движении объектов (например, о вращении ведра) в совершенно пустой Вселенной. Наш маятник снова качнулся: от реляционизма Лейбница к абсолютизму Ньютона, затем к реляционизму Маха и теперь назад к Эйнштейну, который снова показал, что арена реальности, понимаемая, однако, как пространство-время, а не только как пространство, достаточна в качестве чего-то, предоставляющего окончательный критерий движения. [\[27\]](#)

Гравитация и старинный вопрос

В этом месте можно было бы подумать, что мы дошли до конца нашей истории с ведром, так что идеи Маха оказались неверны, и одержала победу радикально модернизированная Эйнштейном ньютоновская концепция абсолютного пространства и времени. Но истина тоньше и интереснее. Однако если изложенные до сих пор идеи вам в новинку, то стоит сделать перерыв, прежде чем штурмовать последние разделы этой главы. Чтобы освежить свою память, мы привели краткую сводку позиций в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Сводка различных взглядов на природу пространства и пространства-времени

Ньютон	Пространство является сущностью; ускоренное движение не относительно; абсолютистская позиция
Лейбниц	Пространство не является сущностью; всякое движение относительно; реляционная позиция
Мах	Пространство не является сущностью; ускоренное движение относительно к распределению массы в среднем по Вселенной; реляционная позиция
Эйнштейн (специальная теория относительности)	Пространство и время по отдельности относительны; пространство-время является абсолютной сущностью

Раз вы читаете эти строки, то я надеюсь, что вы готовы сделать следующий крупный шаг в истории пространства-времени — шаг, подготовленный по большей части не кем иным, как Эрнстом Махом. Хотя специальная теория относительности, в отличие от теории Маха, приводит к выводу, что даже в совершенно пустой Вселенной вы почувствуете, что вдавливайтесь во внутреннюю стенку вращающегося ведра и что натягивается верёвка, связывающая два вращающихся камня, однако Эйнштейн оставался под глубоким впечатлением от идей Маха. Но Эйнштейн понял, что серьёзное отношение к этим идеям требует значительного их расширения. Мах никогда по-настоящему не определял механизм, посредством которого удалённые звёзды и прочая материя Вселенной могла бы влиять на то, как сильно растягивает в стороны руки при вашем вращении или насколько сильно вас вдавливает во внутреннюю стенку вращающегося ведра. Эйнштейн начал подозревать, что если такой механизм действительно существует, то он должен иметь какое-то

отношение к гравитации.

Это предположение было особенно привлекательным для Эйнштейна, потому что в специальной теории относительности, чтобы сделать анализ обозримым, он полностью проигнорировал гравитацию. Возможно, рассуждал он, более общая теория, включающая как специальную теорию относительности, так и гравитацию, придёт к другому выводу относительно идей Маха. Возможно, предполагал он, обобщение специальной теории относительности, учитывающее гравитацию, покажет, что материя, как близкая, так и удалённая, определяет силу, ощущаемую нами при ускорении.

У Эйнштейна была и другая, в чём-то более веская, причина обратить своё внимание на гравитацию. Он понимал, что специальная теория относительности, базирующаяся на утверждении, что никакой материальный объект и никакое возмущение не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света, прямо конфликтует с ньютоновским универсальным законом гравитации — фундаментальным достижением, с помощью которого более двух столетий с фантастической точностью предсказывали движение Луны, планет, комет и всех прочих небесных тел. Невзирая на экспериментальные подтверждения закона Ньютона, Эйнштейн понимал, что, согласно Ньютону, гравитация мгновенно распространяется от точки к точке, от Солнца к Земле и т. д., т. е. *гораздо быстрее света*, а это прямо противоречит специальной теории относительности.

Для иллюстрации этого противоречия предположим, что у вас выдался действительно прескверный вечер (в вашем родном городе закрылся боулинг-клуб, все позабыли о вашем дне рождения, кто-то съел последний кусок сыра в холодильнике), так что вы захотели побыть наедине с собой, и потому решились на лодочную прогулку при Луне. Луна над головой, на море прилив (именно гравитация Луны притягивает воду, вызывая прилив), отражения лунного света пляшут на поверхности морских волн. Но затем, словно в продолжение вечерних кошмаров, враждебные инопланетяне хватают Луну и мгновенно перебрасывают её на другой конец галактики. Конечно, такое исчезновение Луны было бы очень странным, но если верен ньютоновский закон всемирного тяготения, то этот эпизод повлечёт за собой нечто ещё более странное. Закон Ньютона предсказывает, что вода начнёт спадать (вследствие исчезновения притяжения со стороны Луны) за полторы секунды *до того*, как вы увидите, что Луна исчезла с неба. *Подобно спринтеру, допустившему фальстарт, вода начнёт спадать на полторы секунды раньше.*

Причина здесь в том, что, согласно Ньютону, в тот самый момент, когда исчезает Луна, также *мгновенно* исчезает и её притяжение, так что приливные волны мгновенно начинают спадать. А поскольку на преодоление примерно 400 тыс. км между Луной и Землёй свету требуется примерно полторы секунды, то вы не сразу заметите, что Луна исчезла; в течение полутора секунд вы будете видеть, что волны вдруг начали спадать, тогда как Луна, как обычно, сияет на небосклоне. Таким образом, согласно Ньютону, гравитация может воздействовать на нас раньше света — гравитация может опережать свет — а это, как был уверен Эйнштейн, на самом деле это не так. ^[28]

Поэтому примерно в 1907 г. Эйнштейном завладела идея сформулировать новую теорию гравитации, которая была бы по крайней мере столь же точной, как ньютоновская, но не конфликтовала со специальной теорией относительности. Эта проблема оказалась не чета всем остальным. Гигантский интеллект Эйнштейна наконец-то столкнулся с подобающей ему проблемой. Его тетради того периода теснятся от наполовину сформулированных идей, промахов, когда маленькие ошибки приводили к долгим блужданиям по иллюзорным путям, и восклицаний, что ему удалось решить проблему, за которыми вскоре вновь обнаруживалась ошибка. Наконец, в 1915 г. Эйнштейн нашёл выход. Хотя Эйнштейн и получал помощь в критических ситуациях (особенно от математика Марселя Гроссмана), создание им *общей теории относительности* ознаменовало редкое героическое усилие одного ума, пытающегося постичь Вселенную. Результатом этих усилий явилась ярчайшая жемчужина доквантовой физики.

Путь Эйнштейна к созданию общей теории относительности начался с основного вопроса, который Ньютон скромно опустил два столетия ранее. Как гравитация действует через огромное пространство? За счёт чего страшно далёкое Солнце влияет на движение Земли? Солнце не прикасается к Земле, так как же оно воздействует на Землю? Короче говоря, как работает гравитация? Хотя Ньютон и открыл уравнение, которое с высокой точностью описывает силу гравитации, он вполне осознавал, что оставил без ответа этот важный вопрос. В своих «Началах» Ньютон честно написал: ^[18] «Я оставляю эту проблему на рассмотрение читателя» ^[29]. Как видно, есть аналогия между этой проблемой и той, которую Фарадей и Максвелл решили в начале XIX в., используя представление о магнитном поле, посредством которого магнит воздействует на объекты, не прикасаясь к ним. На основании этого можно предложить аналогичный ответ:

гравитация передаёт воздействие посредством другого поля — гравитационного поля. И, вообще говоря, это правильное предположение. Но проще сказать, чем создать теорию, которая не конфликтовала бы со специальной теорией относительности.

Да, гораздо проще. Эйнштейн отважно взялся за решение этой задачи, и с помощью поразительной схемы, разработанной им спустя десятилетия поисков во тьме, ниспроверг устоявшуюся ньютоновскую теорию гравитации. Равным образом поражает то, что история вернулась к своему началу, поскольку ключевой прорыв Эйнштейна был тесно связан с той самой проблемой, которую Ньютон поднял в примере с ведром: какова истинная природа ускоренного движения?

Эквивалентность гравитации и ускорения

В специальной теории относительности Эйнштейн рассматривал наблюдателей,двигающихся только с постоянной скоростью, — такие наблюдатели никак не ощущают своего движения, и поэтому с полным правом могут заявлять, что это они неподвижны, а двигается весь остальной мир. Щекотка, Царапка и Апу, едущие в поезде, не ощущают своего движения. С их точки зрения двигается Мартин и все, стоящие на платформе. Мартин тоже не чувствует движения. С его точки зрения двигается поезд с пассажирами. Ни одна из точек зрения не является более правильной, чем другая. Но с ускоренным движением всё по-другому, так как вы *можете* ощущать его. Вы чувствуете, как вас вдавливают в спинку кресла, когда автомобиль начинает ускоряться; вы чувствуете, как вас толкает вбок, когда поезд делает резкий поворот; вы чувствуете усиление давления со стороны пола, когда лифт поднимается с ускорением.

Тем не менее эти силы, которые вы всегда должны чувствовать, привлекли внимание Эйнштейна как самые обыкновенные. Когда вы приближаетесь к резкому повороту, ваше тело по привычке напрягается, поскольку предстоящий толчок в сторону неизбежен. И нет способа укрыться от такого воздействия. Единственный способ избежать такого толчка — это поменять свои планы и не поворачивать. Для Эйнштейна это прозвучало ударом колокола. Он подметил, что то же самое характеризует и силу гравитации. Если вы находитесь на планете Земля, то подвергаетесь силе земного гравитационного притяжения. Это неизбежно. Нет способа избежать её. В то время как от электромагнитных и ядерных сил вы можете каким-либо способом укрыться (экранироваться), нет способа защититься

себя от гравитации. И в один из дней 1907 г. Эйнштейн осознал, что это не просто аналогия. В одной из тех вспышек прозрения, в стремлении к которым учёные проводят жизнь, Эйнштейн понял, что гравитация и ускоренное движение — две стороны одной медали.

Эйнштейн понял, что подобно тому как изменив свои планы, чтобы избежать ускорения, вы можете избежать вдавливания в автомобильное кресло или толчка в сторону при повороте, так можно избежать и обычных ощущений, связанный с гравитационным притяжением. Идея чудесно проста. Чтобы понять её, представим, что Барни^[19] отчаянно пытается выиграть Кубок Спрингфилда — соревнование толстяков: кто сбросит за месяц больший вес? Но после двухнедельной «жидкой диеты» (на пиве «Дафф»), встав на весы в своей ванной комнате, Барни теряет всякую надежду. В приступе отчаяния он выбрасывается из окна ванной прямо с прилипшими к его ногам весами. И прежде чем угодить прямоиком в бассейн соседа, Барни бросает взгляд на показание весов и что же он видит? Да, Эйнштейн первым осознал, и осознал полностью, что Барни видит, как стрелка весов встала на «ноль». Весы падают точно с той же скоростью, что и Барни, так что его ноги совсем не давят на них. *В свободном падении Барни ощущает ту же невесомость, что и космонавты в открытом космосе.*

Фактически, если мы вообразим, что Барни, выпрыгнув из окна, попадает в глубокую шахту, из которой откачан весь воздух, тогда на его пути вниз не только сопротивление воздуха будет устранено, но будут устранены и все обычные напряжения тела, возникающие из-за давления ступней на лодыжки, оттягивания руками плеч и т. д. — поскольку каждый атом его тела будет падать с совершенно одинаковой скоростью.^[30] Закрыв глаза во время падения, Барни почувствует точно то же самое, что он почувствовал бы в открытом космосе. (Или, в случае, если вам больше нравятся примеры неодушевлённые: если в ту же шахту сбросить пару камней, связанных верёвкой, то верёвка останется ненатянутой, как в открытом космосе.) Таким образом, меняя своё состояние движения — полностью «отдаваясь гравитации», — Барни может имитировать отсутствие гравитации. (На самом деле так и тренируются астронавты в НАСА, привыкая к невесомости на модифицированном Боинге 707, прозванном ими *Vomit Comet*^[20], который периодически входит в состояние свободного падения.)

Аналогично, подходящим образом меняя движение, можно создавать силу, совершенно идентичную гравитации. Например, вообразим, что

Барни попадает в космическую капсулу с космонавтами в состоянии невесомости, а от ног нашего бедолаги ещё не отлипли весы, так и показывающие «ноль». Если капсула включит двигатели и начнёт ускоряться, всё существенно изменится. Барни почувствует давление со стороны пола, такое же, как вы ощущаете в кабине ускоренно поднимающегося лифта. И поскольку ноги Барни теперь уже давят на весы, то их показания сдвинутся с «нуля». Если капитан запустит двигатель с подходящей мощностью, то показание весов Барни точно совпадёт с тем, что он видел, находясь в ванной комнате. За счёт подходящего ускорения Барни теперь ощущает силу, неотличимую от гравитации.

То же самое верно по отношению и к другим видам ускоренного движения. Например, если Барни присоединится к Гомеру, привязанному к внутренней стенки вращающегося в открытом космосе ведра, и встанет на внутреннюю стенку под прямым углом к Гомеру, то показания весов опять сдвинутся с «нуля», поскольку на весы будут давить ноги Барни. Можно подобрать такую скорость вращения ведра, что весы покажут тот же вес, что и в ванной комнате: ускорение вращающегося ведра может с успехом заменять гравитацию, не отличаясь от неё по своему действию.

Всё это привело Эйнштейна к заключению, что ощущаемая сила гравитации и сила, ощущаемая от ускорения, — это одна и та же сила. Они эквивалентны. Эйнштейн назвал это *принципом эквивалентности*.

Посмотрим, что это значит. Прямо сейчас вы чувствуете воздействие гравитации. Если вы стоите, то ваши ступни чувствуют, как пол поддерживает ваш вес. Если вы сидите, вы чувствуете поддержку где-то ещё. И, если только вы не читаете эти строки сидя в самолёте или в автомобиле, вы, вероятно, думаете, что вы неподвижны — что вы не ускоряетесь и даже вообще не двигаетесь. Но, согласно Эйнштейну, вы на самом деле ускоряетесь. Поскольку вы всё ещё сидите, то это звучит как-то глупо, но не забывайте задавать обычный вопрос: по отношению к чему вы ускоряетесь? Ускоряетесь с чьей точки зрения?

В специальной теории относительности абсолютное пространство-время давало критерий ускоренного движения, но эта теория не учитывала гравитацию. Теперь, с помощью принципа эквивалентности, Эйнштейн дал более общий взгляд на вещи, включающий воздействие гравитации. И это радикально изменило перспективу. *Поскольку гравитация и ускорение эквивалентны, то если вы чувствуете воздействие гравитации, значит, вы ускоряетесь.* Эйнштейн заключил, что только те наблюдатели, которые не чувствуют вообще никаких сил, включая и силу гравитации, могут с полным правом заявить, что они не ускоряются. Такие свободные от сил

наблюдатели предоставляют истинную точку отсчёта для описания движения, и признание именно этого требует полного переворота в наших представлениях обо всех этих вещах. В примере с Барни, выпрыгивающим из окна в глубокую шахту, мы привычно считаем, что он начинает двигаться с ускорением по направлению к земной поверхности. Но Эйнштейн не согласится с таким утверждением. Согласно Эйнштейну, Барни *не* ускоряется. Он не чувствует никакой силы. Он невесом. Он ощущает себя словно парящим в глубокой тьме открытого космического пространства. Именно он служит системой отсчёта, по отношению к которой следует рассматривать движение. А с точки зрения Барни это *вы в действительности* ускоряетесь, когда спокойно сидите и читаете у себя дома. С точки зрения Барни, пролетающего в свободном падении мимо вашего окна (а его точка зрения, согласно Эйнштейну, служит истинным критерием движения), вы, Земля и всё прочее, что вы считаете неподвижным, — всё это *ускоренно движется вверх*. Эйнштейн скажет, что это голова Ньютона сама налетела на яблоко, а не яблоко упало на его неподвижную голову.

Несомненно, это радикально иной способ думать о движении. Но он привязан к признанию того простого факта, что вы чувствуете гравитацию, только когда сопротивляетесь ей. Наоборот, когда вы полностью сдаётесь гравитации, вы не чувствуете её. Если во время вашего падения на вас больше ничто не действует (например, сопротивление воздуха), то вы ощущаете себя так, как ощущали бы себя, если бы свободно парили в открытом космосе, а уж о свободно парящем человеке никак не скажешь, что он ускоряется.

Таким образом, только свободно парящие наблюдатели, независимо от того, находятся ли они в открытом космосе или на пути столкновения с Землёй, могут с полным правом заявить, что не испытывают никакого ускорения. Если мимо вас проплывает такой наблюдатель и между вами имеется относительное ускорение, то, согласно Эйнштейну, это *вы* ускоряетесь.

Заметим, что, фактически, ни Щекотка, ни Царапка, ни Апу, ни даже Мартин — никто из них не может с полным правом заявить, что он был неподвижен во время дуэли, поскольку каждый из них чувствовал земное притяжение. Это никак не сказывается на наших предыдущих рассуждениях, поскольку ранее мы рассматривали только горизонтальное движение, не затрагиваемое вертикально направленной силой гравитации, ощущаемой всеми участниками дуэли. Но принципиально важно то, что связь, установленная Эйнштейном между гравитацией и ускорением,

означает, что с полным правом можно считать неподвижными только тех наблюдателей, которые не чувствуют вообще *никакой* силы.

Установив связь между ускорением и гравитацией, Эйнштейн оказался готов принять вызов Ньютона и начать искать объяснение тому, как работает гравитация.

Искривления, рябь и гравитация

В специальной теории относительности Эйнштейн показал, что каждый наблюдатель нарезает пространство-время на параллельные слои, которые он считает срезами всего пространства в последовательные моменты времени; неожиданный поворот состоит в том, что наблюдатели,двигающиеся друг относительно друга с постоянными скоростями, нарезают пространство-время под разными углами. Если бы такой наблюдатель начал ускоряться, он мог бы предположить, что ежесекундные изменения его скорости и/или направления движения отражаются на ежесекундных изменениях угла нарезки и ориентации его слоёв. Грубо говоря, так и происходит. Эйнштейн (используя геометрические представления, сформулированные Карлом Фридрихом Гауссом, Георгом Бернхардом Риманом и другими математиками девятнадцатого столетия), преодолевая трудности, развил эту идею и показал, что из-за изменения углов нарезки пространства-времени слои получаются *искривлёнными*, но они прекрасно подогнаны друг к другу, как ложки в серебряном футляре, что схематически проиллюстрировано на рис. 3.8. *Ускоряющийся наблюдатель нарезает пространство на искривлённые слои.*

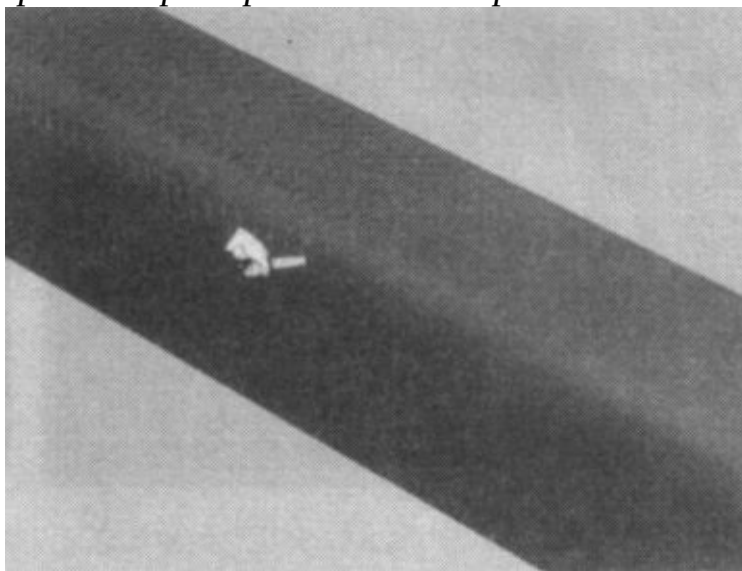
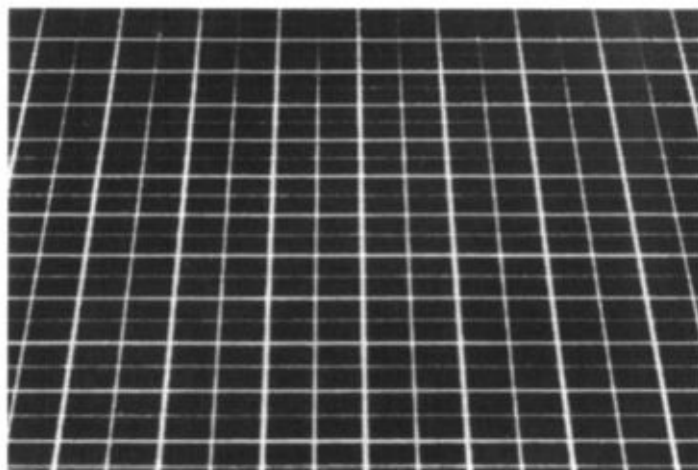


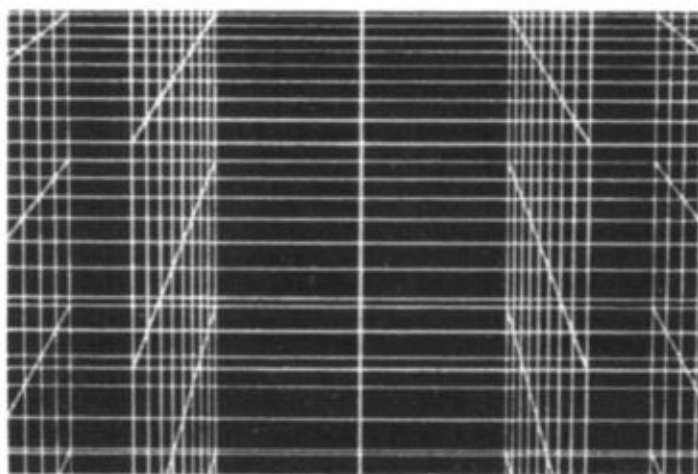
Рис. 3.8. Согласно общей теории относительности блок пространства-времени не только будет нарезаться под разными углами в разные моменты времени (наблюдателями в относительном движении), но и сами слои будут деформированы или искривлены в присутствии материи или энергии

Поняв это, Эйнштейн смог весьма эффективно использовать принцип эквивалентности. Поскольку гравитация и ускорение эквивалентны, Эйнштейн понял, что сама гравитация есть ни что иное, как искривление ткани пространства-времени. Посмотрим, что это значит.

Если вы толкнёте металлический шарик на гладком деревянном полу, то он покатится по прямой линии. Но если вы недавно пережили ужасный потоп, из-за чего покорёжился весь ваш пол, то шарик не покатится по прямой. В своём движении он теперь будет следовать искривлениям пола. Эйнштейн применил эту простую идею к ткани Вселенной. Он представил, что при отсутствии материи или энергии (нет ни Солнца, ни Земли, ни звёзд, ни прочих объектов) пространство-время, подобно гладкому деревянному полу, не имеет ни впадин, ни искривлений. Оно плоское. Это схематически проиллюстрировано на рис. 3.9а, где мы обратим внимание на сетку, введённую в пространстве. Конечно, пространство на самом деле трёхмерно, так что более адекватен рис. 3.9б, но двумерные схемы проще понять, чем трёхмерные, поэтому мы будем продолжать их использовать. Затем Эйнштейн представил, что присутствие материи и энергии оказывает такое же воздействие на пространство, как потоп на деревянный пол. Материя и энергия, например Солнце, вызывают искривление пространства (и пространства-времени^[21]), как это проиллюстрировано на рис. 3.10а, б. И Эйнштейн показал, что подобно тому как шар на покореженном полу катится по кривой линии, так и любой объект, движущийся в искривлённом пространстве (например, Земля в окрестностях Солнца), описывает кривую траекторию, как проиллюстрировано на рис. 3.11а, б.

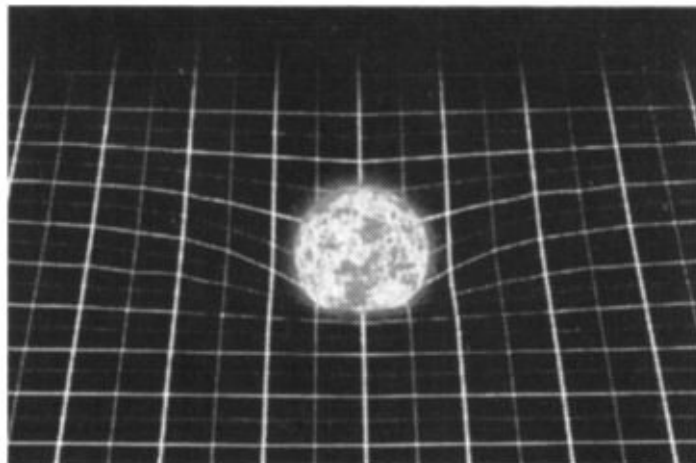


a)

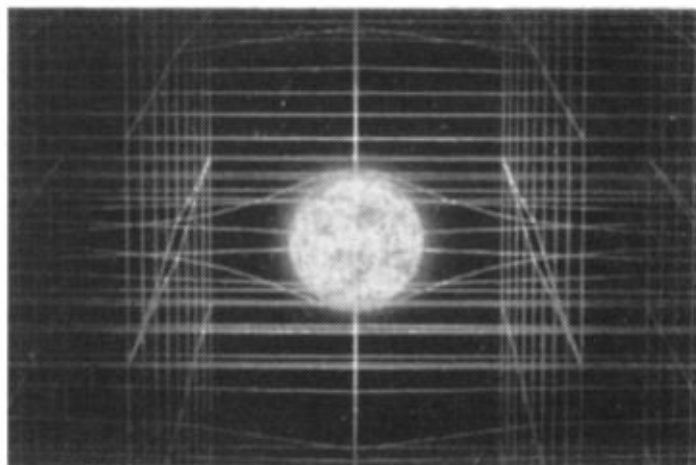


б)

Рис. 3.9. (*a*) Плоское пространство (двумерное), (*б*) Плоское пространство (трёхмерное)

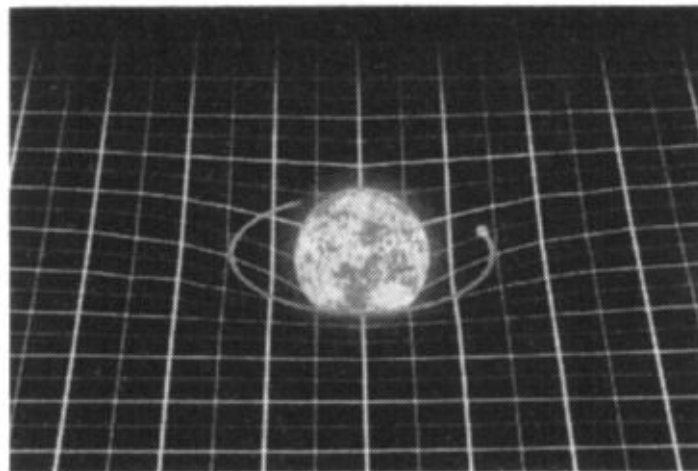


a)

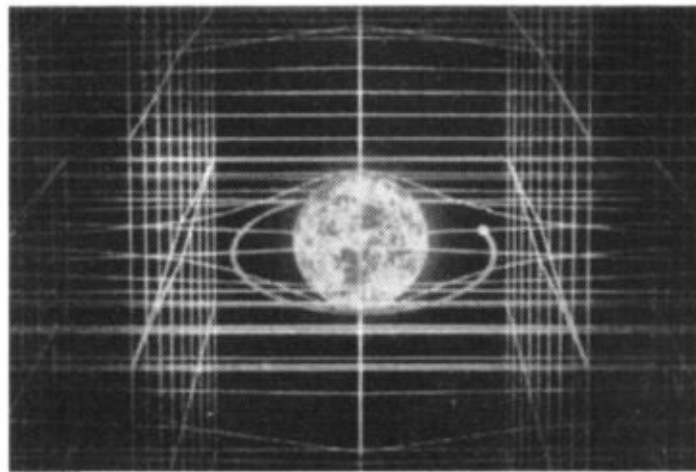


б)

Рис. 3.10. Пространство, деформированное Солнцем: (а) двумерное; (б) трёхмерное



a)



б)

Рис. 3.11. Земля остаётся на орбите вокруг Солнца, поскольку она движется по искривлённой линии ткани пространства-времени, и это искривление вызвано присутствием Солнца: (a) двумерная картина; (б) трёхмерная картина

Материя и энергия словно накладывают сеть холмов и долин, по которой объекты направляются невидимой рукой ткани пространства-времени. Вот так, согласно Эйнштейну, гравитация передаёт своё воздействие. Та же идея применима и к нашей повседневной жизни. Прямо сейчас ваше тело соскользнуло бы вниз по прогибу в ткани пространства-времени, вызванному присутствием Земли. Но ваше движение блокируется поверхностью, на которой вы сидите или стоите. Направленное вверх давление, которое вы чувствуете почти в каждый момент своей жизни

(находитесь ли вы на земле, на полу своего дома, в уютном кресле или на своей широченной кровати), препятствует вашему соскальзыванию вниз в прогиб пространства-времени. Напротив, если вы взлетите высоко на скейтборде, то на какое-то мгновение отдадитесь гравитации, позволив ей свободно двигать ваше тело вдоль одного из склонов пространства-времени.

Рисунки 3.9, 3.10 и 3.11 схематично иллюстрируют триумф десятилетней борьбы Эйнштейна. Его основные усилия в течение тех лет были направлены на определение точной формы и величины деформаций, вызванных данным количеством материи или энергии. Математический результат, полученный Эйнштейном, отражён в так называемых *полевых уравнениях Эйнштейна* (на основе этого результата и сделаны упомянутые выше рисунки). Как свидетельствует название, Эйнштейн счёл деформацию пространства-времени проявлением — геометрическим воплощением — гравитационного поля. Чтобы ввести в игру геометрию пространства, Эйнштейн смог найти уравнения, играющие для гравитации ту же роль, что уравнения Максвелла для электромагнетизма.^[31] С помощью этих уравнений затем были рассчитаны орбиты различных планет и даже траектория света, испущенного далёкой звездой и проходящего через искривлённое пространство-время. Полученные результаты были не только подтверждены с высокой степенью точности, но, в конкуренции с теорией Ньютона, теория Эйнштейна оказалась точнее.

Более того, поскольку общая теория относительности описывает детальный механизм действия гравитации, она позволяет ответить на вопрос: как быстро передаётся воздействие гравитации? Вопрос о скорости передачи сводится к вопросу о том, насколько быстро форма пространства может меняться во времени. Иными словами, как быстро могут деформации и рябь — рябь, подобная той, что возникает на поверхности пруда от брошенного камня, — бежать через пространство? Эйнштейн смог ответить на этот вопрос, и ответ, к которому он пришёл, был чрезвычайно радующий. Он установил, что деформации и рябь — т. е. гравитация — распространяются не мгновенно, как в теории Ньютона, а *точно со скоростью света*.^[22] Ничуть не медленнее или быстрее, полностью согласуясь с ограничением скорости, наложенным специальной теорией относительности. Если инопланетяне утащат Луну с её орбиты, прилив начнёт спадать на полторы секунды позже, точно в тот момент, когда мы увидим, что Луна исчезла. Общая теория относительности Эйнштейна торжествует там, где теория Ньютона терпит крах.

Общая теория относительности и ведро

Помимо того что общая теория относительности дала миру математически элегантную, концептуально мощную и, наконец, полностью непротиворечивую теорию гравитации, она также основательно изменила наш взгляд на пространство и время. Как в ньютоновской концепции, так и в специальной теории относительности пространство и время предоставляли неизменную сцену для событий Вселенной. Хотя нарезка космоса на слои пространства в последовательные моменты времени придавала специальной теории относительности гибкость, немыслимую в ньютоновские времена, пространство и время никак не реагировали на происходящее во Вселенной. Пространство-время в образе «буханки», как мы его называли, представляется заданным раз и навсегда. В общей теории относительности всё изменилось. Пространство и время стали игроками в эволюционирующем космосе. Они ожили. Материя заставляет пространство искривляться, это заставляет материю двигаться, материя в своём движении искривляет пространство по-другому и т. д. Общая теория относительности обеспечивает хореографию для причудливого космического танца пространства, времени, материи и энергии.

Этот вывод ошеломляет. Но давайте теперь вернёмся к нашему старому вопросу: как насчёт ведра? Обеспечивает ли общая теория относительности физическую основу для реляционистских идей Маха, на что надеялся Эйнштейн?

На протяжении многих лет этот вопрос вызывал немало споров. Сначала Эйнштейн полагал, что общая теория относительности полностью включает в себя точку зрения Маха, причём он считал эту точку зрения настолько важной, что окрестил её *принципом Маха*. Действительно, в 1913 г., интенсивно работая над завершением общей теории относительности, Эйнштейн написал Маху воодушевлённое письмо, в котором описал, как его теория могла бы подтвердить анализ Маха ньютоновского эксперимента с ведром.^[32] И в 1918 г., при написании статьи, перечисляющей три важнейшие идеи, лежащие в основании общей теории относительности, третьим пунктом Эйнштейн указал принцип Маха. Однако общая теория относительности весьма тонка и содержит некоторые аспекты, в которых физикам, включая самого Эйнштейна, удалось полностью разобраться лишь спустя многие годы. Всё больше разбираясь в этих тонкостях, Эйнштейн обнаружил, что ему всё труднее полностью включить принцип Маха в общую теорию относительности. Мало-помалу он расстался с

иллюзиями по поводу идей Маха, и в последние годы своей жизни отказался от них совсем.^{33}

Имея за плечами дополнительный опыт пятидесяти лет исследований и размышлений, мы можем с современной точки зрения оценить, до какой степени общая теория относительности согласуется с рассуждениями Маха. И хотя всё ещё остаются некоторые разногласия, я думаю, правильнее всего будет сказать, что в некоторых аспектах общая теория относительности имеет отчётливый привкус махианства, но она не совпадает с полностью реляционистскими взглядами, которые защищал Мах. Вот что я имею в виду.

Мах утверждал,^{34} что когда поверхность вращающейся воды становится вогнутой, или когда вы чувствуете, что ваши руки растягивает в стороны, или когда натягивается верёвка, связывающая два камня, это не имеет никакого отношения к некоторому гипотетическому — и, с его точки зрения, полностью вводящему в заблуждение — понятию абсолютного пространства (или абсолютного пространства-времени, согласно нашим более современным представлениям). Вместо этого он считал, что явление ускоренного движения связано со всей материей, рассеянной по космосу. Не будь материи, не было бы и понятия ускорения, и не было бы ни одного из перечисленных выше физических эффектов (вогнутой поверхности воды, разброса рук, натяжения верёвки).

Что об этом говорит общая теория относительности?

Согласно общей теории относительности о всяком движении и, в частности, об ускоренном движении следует судить по отношению к свободно падающим наблюдателям — наблюдателям, которые полностью отделились гравитации и не подвергаются воздействию никаких других сил. Теперь подчеркнём ключевой момент: гравитационная сила, которой подчиняется свободно падающий наблюдатель, возникает из-за наличия всей материи (и энергии), рассеянной в космосе. Земля, Луна, удалённые планеты, звёзды, газовые туманности, квазары и галактики — все они вносят свой вклад в гравитационное поле (на геометрическом языке — в кривизну пространства-времени) прямо там, где вы сейчас сидите. Более массивные и более приближённые тела оказывают большее гравитационное воздействие, но гравитационное поле, ощущаемое вами, представляет совокупное влияние всей материи.^{35} Траектория, которой вы бы последовали, полностью отдавшись гравитации и начав свободное падение (и, тем самым, точка зрения, по отношению к которой можно судить об ускоренном движении), зависела бы от всей материи в космосе,

как от звёзд в небесах, так и от соседского дома. Таким образом, когда в общей теории относительности какой-либо объект называют ускоряющимся, это означает, что объект ускоряется по отношению к системе отсчёта, определяемой материей, рассеянной по всей Вселенной. Это заключение сродни тому, что отстаивал Мах. В этом смысле общая теория относительности включает в себя что-то от идей Маха.

Тем не менее общая теория относительности подтверждает не все заключения Маха, в чём можно прямо убедиться, снова рассмотрев ведро, вращающееся в совершенно пустой Вселенной. В пустой неизменной Вселенной, где нет ни звёзд, ни планет, где нет вообще ничего, — нет и гравитации.^{36} А без гравитации пространство-время не деформировано — оно принимает простую неискривленную форму, показанную на рис. 3.9б, — и это значит, что мы вернулись к условиям специальной теории относительности. (Вспомним, что при создании специальной теории относительности Эйнштейн игнорировал гравитацию. Общая теория относительности устраняет этот недостаток путём включения гравитации, но когда Вселенная пуста и неизменна, нет и гравитации, так что общая теория относительности сводится к специальной теории относительности). Если в эту пустую Вселенную мы теперь введём ведро, то из-за своей малой массы оно едва ли вообще повлияет на форму пространства. Так что ход рассуждений, проведённых нами для ведра в рамках специальной теории относительности, равным образом справедлив и в общей теории относительности. В противоречии с утверждением Маха общая теория относительности приходит к тому же выводу, что и специальная теория относительности, утверждая, что даже в пустой Вселенной вы *будете* чувствовать давление со стороны внутренней стенки вращающегося ведра; в пустой Вселенной ваши руки *будет* тянуть в стороны, когда вы вращаетесь; в пустой Вселенной верёвка, связывающая два вращающихся камня, *будет* натягиваться. Мы приходим к выводу, что даже в общей теории относительности пустое пространство-время даёт систему отсчёта для определения ускоренного движения.

Следовательно, хотя общая теория относительности и включает в себя некоторые идеи Маха, она не полностью отвечает концепции относительности движения, которую отстаивал Мах.^{37} Принцип Маха является примером идеи, вдохновившей на революционное открытие, хотя само открытие в конечном счёте не полностью согласуется с этой идеей.

Вращающееся ведро имело долгую историю. От ньютоновского абсолютного пространства и абсолютного времени к реляционным концепциям Лейбница и Маха, затем к осознанию Эйнштейном в специальной теории относительности, что пространство и время относительны и лишь в своём единстве дают абсолютное пространство-время, а затем к последующему открытию Эйнштейном общей теории относительности, в которой пространство-время является активным игроком в раскрывающемся космосе — ведро Ньютона всегда было с нами. Крутясь в нашем воображении, ведро служило простым ясным тестом, позволяющим судить, является ли невидимая, абстрактная, неосязаемая ткань пространства — и пространства-времени в более общем случае — достаточно реальной, чтобы предоставлять окончательную систему отсчёта для определения движения. Каков же вердикт? Хотя проблема всё ещё обсуждается, но наиболее прямое прочтение Эйнштейна и его общей теории относительности, как мы теперь видим, говорит о том, что пространство-время может предоставить такую систему отсчёта: *пространство-время есть нечто.*^[38]

Однако отметим, что этот вывод также является поводом для торжества последователей более широко определённого реляционного взгляда. С точки зрения Ньютона и с точки зрения специальной теории относительности пространство и пространство-время являются сущностями, по отношению к которым можно определить ускоренное движение. И поскольку с этих точек зрения пространство и пространство-время абсолютно неизменны, то и понятие ускорения абсолютно. Однако в общей теории относительности характер пространства-времени совсем иной. Пространство и время в общей теории относительности динамичны: они изменчивы и реагируют на присутствие массы и энергии; они не абсолютны. Пространство-время своими деформациями и искривлениями воплощает гравитационное поле. Так что в общей теории относительности ускорение по отношению к пространству-времени далеко от абсолютной, непоколебимо нереляционной концепции предыдущих теорий. Вместо этого, как ярко высказался Эйнштейн за несколько лет до своей смерти,^[39] ускорение по отношению к пространству-времени общей теории относительности *относительно*. Это не есть ускорение относительно материальных объектов вроде камней или звёзд, но относительно чего-то столь же реального, осязаемого и меняющегося: относительно поля — гравитационного поля.^[23] В этом смысле пространство-время, будучи воплощением гравитации, *настолько* реально в общей теории

относительности, что предоставляемый им критерий для определения движения могут спокойно принять многие реляционисты.

Споры по вопросам, обсуждавшимся в этой главе, несомненно, будут продолжаться, по мере того как мы нащупываем понимание, чем на самом деле являются пространство, время и пространство-время. С развитием квантовой механики краски только сгущаются. Концепции пустого пространства и пустоты обретают совершенно новый смысл, когда на сцену выходит квантовая неопределённость. Действительно, с 1905 г., когда Эйнштейн покончил с концепцией светового эфира, идея, что пространство наполнено невидимыми субстанциями, упорно боролась за своё возвращение. Как мы увидим в последующих главах, ключевые достижения современной физики возродили различные формы эфироподобной сущности, ни одна из которых не установила абсолютный критерий движения подобно оригинальному варианту светового эфира, но все они бросают вызов наивному представлению о том, что означает для пространства-времени быть пустым. Более того, как мы увидим, самая главная роль, которую пространство играет в классической Вселенной, — роль посредника, разделяющего объекты друг от друга, роль промежуточной субстанции, позволяющей определённо утверждать, что один объект отделён и независим от другого, — основательно пересматривается из-за существования поразительных квантовых связей.

Глава 4. Запутывание пространства

Что значит быть разделённым в квантовой Вселенной?

Принять специальную и общую теории относительности — означает отказаться от ньютоновского абсолютного пространства и абсолютного времени. Поскольку это нелегко, вы можете с этой целью потренировать ум. Всякий раз, когда вы перемещаетесь, представляйте себе, что ваше понятие «сейчас» отличается от «сейчас», ощущаемого всеми, кто не движется вместе с вами. Разогнавшись на автостраде, представляйте себе, что ваши часы тикают с другой скоростью по сравнению с часами в домах, мимо которых вы проносите. Взойдя на вершину горы, представляйте себе, что из-за деформации пространства-времени время течёт для вас быстрее, чем для тех, кто подвержен действию более сильной гравитации на земле далеко внизу. Я говорю «представьте», поскольку в обычных условиях, подобных перечисленным, релятивистские эффекты настолько мизерны, что их совершенно невозможно заметить. Таким образом, повседневный опыт не может вскрыть, как на самом деле работает Вселенная, и именно поэтому спустя столетие после Эйнштейна никто, не исключая и профессиональных физиков, не ощущает на себе релятивистские эффекты. Это и не удивительно; нужно попасть в очень экстремальные условия, чтобы жёсткая хватка относительности дала какие-нибудь преимущества в борьбе за существование. Неверные ньютоновские концепции абсолютного пространства и абсолютного времени просто великолепно работают при малых скоростях и умеренной гравитации, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, поэтому наши ощущения не находились под давлением эволюционного отбора, который бы развил в нас релятивистские чувства. Поэтому для глубокого осознания и верного понимания того, как устроена Вселенная, нам требуется использовать интеллект, восполняющий недостатки наших органов чувств.

В то время как теория относительности полностью разрушила наши традиционные представления об устройстве Вселенной, другая революция, произошедшая между 1900 и 1930 гг., тоже перевернула физику вверх дном. Она началась на рубеже XX в. с пары статей о свойствах излучения, одна из которых принадлежала Макс Планку, а другая — Эйнштейну; эти статьи и привели после тридцати лет интенсивных исследований к

формулировке *квантовой механики*. Как и теория относительности, эффекты которой становятся существенными при экстремальной скорости или гравитации, так и новая физика квантовой механики проявляется в полной мере только в другой экстремальной ситуации: в области чрезвычайно малых расстояний. Однако есть глубокое различие между революциями, вызванными теорией относительности и квантовой механикой. Странность теории относительности происходит от того, что наши личные ощущения пространства и времени отличаются от ощущений других наблюдателей. Эта странность порождена сравнением. Мы вынуждены признать, что наш взгляд на реальность является лишь одним из многих — в сущности, из бесконечно многих — взглядов, которые все прекрасно встраиваются в картину целостного пространства-времени.

С квантовой механикой всё по-другому. Её необычность очевидна без сравнения. Развить в себе квантово-механическую интуицию гораздо труднее, поскольку квантовая механика рушит наше собственное, личное представление о реальности.

Мир согласно квантовым представлениям

Каждая эпоха создаёт свои истории или метафоры о рождении и устройстве Вселенной. Согласно древнеиндийскому мифу Вселенная была создана, когда боги расчленили первородного гиганта Пурушу, голова которого стала небом, ступни — землёй, а дыхание — ветром. По Аристотелю Вселенная состоит из пятидесяти пяти концентрических хрустальных сфер, самая дальняя из которых является небесами, обрамляющими планеты, Землю с её элементами, и заканчивается вся система сфер семью кругами ада.^[40] Благодаря Ньютону (с его точной математической формулировкой законов движения) описание Вселенной вновь изменилось. Вселенная стала похожей на гигантский часовой механизм: после того как она была заведена и приведена в начальное состояние, часовая Вселенная тикает от одного момента к другому с совершенной регулярностью и предсказуемостью.

Специальная и общая теории относительности указали на тонкость метафоры часового механизма: не существует единых универсальных часов; разные наблюдатели не соглашаются друг с другом по поводу одновременности событий, у них разное представление о том, что происходит *сейчас*. Но даже при этих условиях Вселенная работает как часы. Пусть это будут ваши часы и история Вселенной с вашей точки

зрения, но в этой истории Вселенная разворачивается с такой же регулярностью и предсказуемостью, как и в ньютоновской системе. Если каким-либо образом вы узнали состояние Вселенной сейчас — так что вы знаете, где находится *каждая* частица и с какой скоростью и в каком направлении она двигается, — то, в принципе, используя законы физики (и с этим согласятся Ньютон и Эйнштейн), можно предсказать состояние Вселенной как угодно далеко в будущем или узнать, какой она была как угодно далеко в прошлом. ^{41}

Квантовая механика прерывает эту традицию. Мы *не можем* одновременно знать точное положение и точную скорость даже одной-единственной частицы. Мы *не можем* с полной уверенностью предсказать результат даже простейшего эксперимента, не говоря уж об эволюции космоса в целом. Квантовая механика показывает, что в лучшем случае мы можем лишь предсказать *вероятность* того, что эксперимент приведёт к тому или иному результату. И поскольку квантовая механика была проверена в течение десятилетий чрезвычайно точными экспериментами, то ньютоновские космические часы, даже модернизированные Эйнштейном, оказываются непригодной метафорой; мир устроен явно иначе.

Но разрыв с прошлым ещё более радикален. Несмотря на то что теории Ньютона и Эйнштейна резко расходятся во взглядах на природу пространства и времени, они согласуются друг с другом в некоторых основных понятиях, которые кажутся самоочевидными истинами. Если два объекта разделены пространством (например, если в небе две птицы разлетаются от вас в разные стороны), то мы можем считать и действительно считаем эти объекты независимыми. Мы считаем их отдельными сущностями. Пространство, каким бы оно ни было по своей сути, является средой, которая разделяет и разграничивает объекты. Это то, что делает пространство. Объекты, занимающие различное положение в пространстве, являются разными объектами. Более того, чтобы один объект повлиял на другой, он должен каким-то образом преодолеть разделяющее их пространство. Одна птица может подлететь к другой, преодолев пространство между ними, а затем клюнуть или толкнуть своего спутника. Один человек может повлиять на другого, выстрелив из рогатки, что заставит камень преодолеть пространство между ними, или закричав, что вызовет «эффект домино» среди молекул воздуха, которые по цепочке, подталкивая друг друга, доставят крик до барабанной перепонки адресата. Можно придумать и более изощрённые способы передачи воздействия через пространство: можно выстрелить из лазера, вызвав

электромагнитную волну (луч света), которая и преодолевает пространство; или, уподобившись инопланетным шутникам из предыдущей главы, можно потрясти или переместить массивное тело (вроде Луны), пошлав гравитационное возмущение, распространяющееся от одной точки пространства к другой. Несомненно, мы можем воздействовать через пространство самими разными способами, но в любом случае для своего воздействия мы используем кого-нибудь или что-нибудь, перемещающееся отсюда туда, и воздействие может быть оказано только тогда, когда этот агент достигает своей цели назначения.

Физики называют это свойство Вселенной *локальностью*, подчёркивая тот момент, что можно непосредственно воздействовать только на то, что находятся вблизи вас, т. е. локально. Колдовство противоречит локальности, поскольку допускает, что какие-то действия здесь могут повлиять на нечто там без необходимости, чтобы что-то пропутешествовало отсюда туда, но повседневный опыт убеждает нас, что проверяемые, повторяемые эксперименты подтверждают локальность.^{42} И, в основном, так и есть.

Однако ряд экспериментов, проведённых за пару последних десятилетий, показал, что нечто, что мы делаем здесь (вроде измерения определённых характеристик частицы), может быть тонким образом переплетено с чем-то, что происходит где-то там (наподобие результата измерения определённых характеристик другой удалённой частицы) без передачи отсюда туда чего бы то ни было. Это явление может привести в полное замешательство, но оно вполне согласуется с законами квантовой механики и было предсказано на её основе задолго до того, как технологический прогресс позволил провести эксперименты и с удивлением обнаружить в них, что предсказание верно. Это пахнет колдовством; Эйнштейн, одним из первых физиков увидевший (и резко критиковавший) такую возможность, допускаемую квантовой механикой, охарактеризовал её «кошмарной». Но, как мы увидим, дальнедействующие связи, подтверждающиеся в этих экспериментах, чрезвычайно тонки и находятся, в точном смысле этого слова, принципиально за пределами возможностей нашего контроля.

Тем не менее эти результаты, пришедшие как из теоретических, так и из экспериментальных исследований, убедительно показывают, что Вселенная допускает нелокальные взаимосвязи.^{43} Нечто, происходящее здесь, может быть переплетено с чем-то, происходящим там, даже если ничего не передаётся отсюда туда — и даже если не хватает времени, чтобы

хоть что-то, включая свет, могло передаваться между событиями. Это значит, что пространство не может рассматриваться как прежде: промежуточное пространство, *независимо от того, насколько оно велико*, не гарантирует, что два объекта разделены, поскольку квантовая механика допускает запутывание — определённый тип связи, которая может существовать между ними. Частица, подобная одной из бесчисленного числа тех, из которых состоите вы или я, может убежать, но не может спрятаться. Согласно квантовой теории и многочисленным экспериментам, подтверждающим её предсказания, квантовые связи между двумя частицами могут сохраняться, даже если сами частицы находятся на противоположных концах Вселенной. С точки зрения их запутывания всё происходит так, как если бы они были совсем рядом друг с другом, несмотря на многие триллионы километров пространства между ними.

Современная физика основательно меняет наши представления о реальности; со многими переворотами мы встретимся в следующих главах. Но самым поразительным переворотом из числа экспериментально проверенных я считаю недавнее осознание того, что наша Вселенная нелокальна.

Красное и синее

Чтобы почувствовать природу нелокальности, возникающей в квантовой механике, представим, что агент Скалли^[24], давно не бывавшая в отпуске, уединяется в семейном имении в Провансе. Она даже не успевает распаковать вещи, как звонит телефон. Это агент Малдер звонит ей из Америки.

«Ты получила посылку, обёрнутую в красную и синюю бумагу?»

Скалли осматривает всю корреспонденцию, сваленную в кучу у двери, и видит посылку. «Малдер, пожалуйста, я убралась ко всем чертям не для того, чтобы возиться с ещё одной кипой секретных материалов».

«Нет-нет, посылка не от меня. Я тоже получил такую, и внутри неё находятся маленькие светонепроницаемые титановые коробочки, пронумерованные от 1 до 1000; а в прилагаемом письме говорится, что ты получишь такую же посылку».

«Да, и что?» — тянет Скалли, начиная опасаться, что титановые коробочки могут прервать её отпуск.

«Ну вот, — продолжает Малдер, — в письме также говорится, что каждая титановая коробочка содержит шарик от инопланетян, который

засветится красным или синим светом в тот момент, когда будет открыта крышка его коробочки».

«Малдер, ты думаешь, я поражена?»

«Подожди, дослушай до конца. В письме говорится, что до открытия любой коробочки у лежащего в ней шарика имеется выбор, вспыхнуть ли красным или синим светом, и он делает свой выбор *случайным образом* в момент открытия крышки коробочки. Но вот что странно. В письме также утверждается, что хотя твои коробочки устроены точно так же, как и мои (шарики в каждой коробочке *случайным образом* выбирают между красным и синим), но наши коробочки работают как-то согласованно, в паре. В письме говорится, что между коробочками имеется некая таинственная связь, так что если я увижу синий свет, когда открою свою коробочку номер 1, то ты тоже увидишь синюю вспышку, когда откроешь свою коробочку номер 1; если я вижу красный свет, когда открою коробочку 2, то ты тоже увидишь красный шарик в своей коробочке номер 2 и т. д.»

«Малдер, я действительно чертовски устала; пусть цирковые фокусы подождут моего возвращения».

«Скалли, пожалуйста. Я знаю, что ты в отпуске, но мы не можем просто так бросить это. Потребуется лишь несколько минут, чтобы проверить, верно ли это».

Скалли понимает, что сопротивление бесполезно, так что она нехотя приступает к делу и открывает свои маленькие коробочки. Сравнивая цвета шариков в каждой коробочке, Скалли и Малдер убеждаются, что всё так и есть, как написано в письме. Шарики вспыхивают то красным, то синим цветом, но в коробочках с одинаковыми номерами Скалли и Малдер всегда находят шарик одинакового цвета. Малдер приходит во всё большее возбуждение от шариков инопланетян, но на Скалли они не производят совершенно никакого впечатления.

«Малдер, — цедит Скалли в трубку телефона, — это тебе нужен отдых. Это же глупо. Очевидно, каждый шарик запрограммирован на свечение красным или синим светом, когда открывается дверца его коробочки. И кто-то послал нам одинаково запрограммированные коробочки, так что мы обнаруживаем один и тот же цвет, когда открываем коробочки с одинаковыми номерами».

«Ну уж нет, Скалли, в письме говорится, что каждый шарик инопланетян *случайно* выбирает между синим и красным цветом в момент открытия крышки его коробочки, а не то, что каждый шарик заранее запрограммирован на выбор того или другого цвета».

«Малдер, — вздыхает Скалли, — моё объяснение безупречно и

отвечает всем данным. Чего ты ещё хочешь? И взгляни сюда, в самый конец письма. Здесь самое смешное. “Инопланетяне” дают примечание мелким шрифтом, что шарик начнёт светиться не только при открытии дверцы его коробочки, но и в результате любого действия, направленного на то, чтобы выяснить, как устроена коробочка, — например, если мы попытаемся выяснить цвет или химический состав шарика перед открытием дверцы. Иными словами, мы не можем проанализировать предполагаемый случайный выбор красного или синего, поскольку любая такая попытка испортит сам эксперимент, который мы пытаемся провести. Это как если бы я сказала, что на самом деле я блондинка, но становлюсь рыжей, как только ты или кто-нибудь или что-нибудь посмотрит на мои волосы или начнёт их анализировать тем или иным способом. Как ты сможешь доказать, что я ошибаюсь? Твои маленькие зелёные человечки очень остроумны — они всё так устроили, что их невозможно разоблачить. А теперь иди и играй со своими коробочками, а я буду спокойно отдыхать».

Может показаться, что Скалли заняла обоснованную научную позицию. Но дело вот в чём. Физики, занимающиеся квантовой механикой — учёные, а не инопланетяне, — в течение примерно восьмидесяти лет делали заявления, что Вселенная устроена подобно тому, как описано в письме. И трудность в том, что сейчас уже есть веские доказательства, что именно точка зрения Малдера, а не Скалли, поддерживается полученными научными данными. Например, согласно квантовой механике частица может находиться в состоянии неопределённости по отношению к значению той или иной своей характеристики (подобно тому как перед открытием крышки шарик инопланетян находится в состоянии неопределённости, каким цветом ему вспыхнуть), и только когда частица увидена (измерена), она *случайным образом* выбирает значение этой характеристики. Как будто этой странности ещё недостаточно, квантовая механика также предсказывает, что между частицами могут существовать связи, сходные со связями между шариками инопланетян. Две частицы могут быть так переплетены квантовыми эффектами, что случайный выбор значения той или иной характеристики оказывается скоррелированным: подобно тому как каждый из шариков инопланетян случайно выбирал между красным и синим, и всё же каким-то непостижимым образом цвета, выбранные шариками в коробочках с одинаковыми номерами, оказывались скоррелированными (оба шарика вспыхивают красным или синим светом), так и значения одной и той же характеристики, выбранные случайно двумя частицами, могут идеально согласовываться друг с другом, даже если эти частицы удалены друг от друга на большое расстояние в пространстве.

Грубо говоря, квантовая механика говорит о том, что даже если две частицы далеко разнесены в пространстве, то одна частица всё равно будет вторить другой.

А вот конкретный пример для тех, кто носит солнечные очки: квантовая механика предсказывает, что с вероятностью 50:50 отдельный фотон (вроде того, что отразился от поверхности озера или асфальтированного шоссе) проникнет сквозь антибликовые поляризованные линзы ваших очков: когда фотон достигнет стекла, он случайным образом «выберет», отразиться ему или пройти сквозь линзы. Поразительно то, что этот фотон может иметь партнёра-фотона, который мчится в противоположном направлении на расстоянии многих километров от вас и, всё же, имея тот же шанс 50:50 пройти сквозь поляризованные линзы других солнечных очков, он каким-то образом повторит всё, что бы ни сделал первый фотон. *Несмотря на то что результат определяется случайным образом, а сами фотоны разделяет громадное расстояние, если первый фотон пройдет сквозь линзы очков, то обязательно пройдет и второй.* Вот такая нелокальность предсказывается квантовой механикой.

Эйнштейн, который никогда не был большим поклонником квантовой механики, был несклонен принимать, что Вселенная подчиняется таким странным правилам. Он отстаивал более привычные объяснения, которые не предполагают, что частицы случайно выбирают свои характеристики в момент измерения. Вместо этого Эйнштейн заявлял, что если две далеко разнесённые в пространстве частицы разделяют общие характеристики, то этот факт ещё не является доказательством существования некой таинственной квантовой связи, мгновенно коррелирующей характеристики этих частиц. Скорее, подобно предположению Скалли о том, что шарики не случайно выбирают между красным и синим, а просто запрограммированы на свечение вполне определённым цветом во время наблюдения, Эйнштейн утверждал, что частицы не случайно выбирают значения своих характеристик, а как-то «запрограммированы» показывать заранее определённое значение в момент измерения. Эйнштейн считал, что фотоны были наделены одинаковыми свойствами в момент испускания и дело вовсе не в том, что они подвержены какому-то странному квантовому запутыванию на больших расстояниях.

В течение пятидесяти лет оставался открытым вопрос, кто же прав — Эйнштейн или сторонники квантовой механики; их спор был очень похож на диалог Скалли и Малдера: любая попытка опровергнуть предполагаемые странные квантово-механические связи и отстоять более привычный эйнштейновский взгляд наталкивалась на заявление, что сами

эксперименты неизбежно исказят рассматриваемые характеристики. Всё это изменилось в 60-е гг. прошлого века. С изумительной проницательностью ирландский физик Джон Белл показал, что этот спор может быть решён экспериментально, что и было сделано в 1980-е гг. Результаты экспериментов недвусмысленно показали, что Эйнштейн ошибался и на самом деле могут существовать странные, таинственные и «кошмарные» квантовые связи между вещами здесь и вещами там.^{44}

Мотивировки, стоящие за этим выводом, столь тонки, что физикам потребовалось более тридцати лет, прежде чем полностью их принять. Но, разобравшись с существенными особенностями квантовой механики, мы увидим, что всё не так сложно.

Посылая волны

Если посветить лазерной указкой на кусочек чёрной засвеченной 35-миллиметровой плёнки, с которой предварительно снята эмульсия вдоль двух очень близких друг к другу и узких линий, то можно непосредственно убедиться в том, что свет является волной. Если вы никогда не делали этого, стоит попробовать (вместо плёнки можно взять, например, проволочную сетку от кофеварки). На экране, распложенном за плёнкой, вы увидите характерную картину, состоящую из светлых и тёмных полос, как на рис. 4.1, и объяснение этой картинке связано с основными свойствами волн. Волны на воде видны лучше, поэтому начнём с волн на поверхности спокойного озера и потом применим наше понимание к свету.

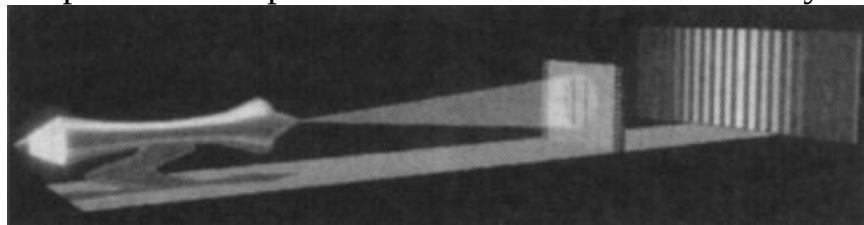
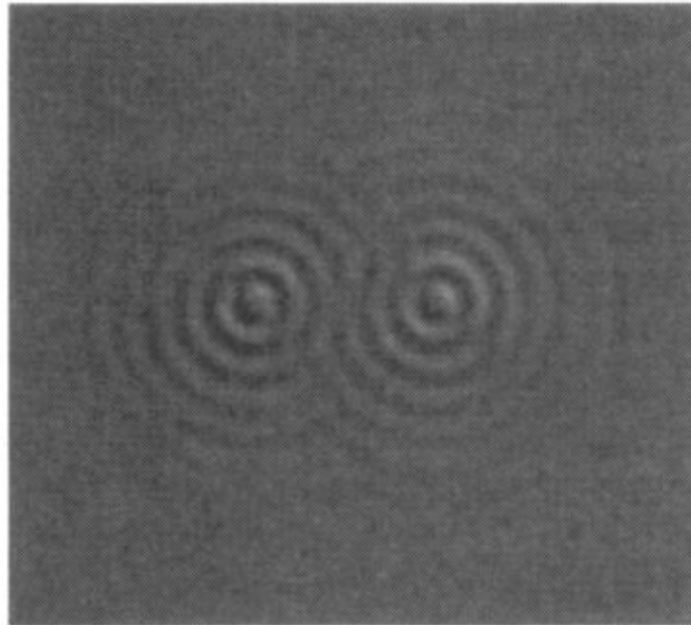


Рис. 4.1. Свет лазера, проходящий через две щели в чёрной плёнке, даёт интерференционную картину, говорящую о том, что свет является волной

Волны, расходящиеся от брошенного в озеро камня, возмущают его плоскую поверхность, создавая области с чуть более высоким и чуть более низким уровнем воды. Самая высокая часть волны называется *гребнем*, а самая низкая — *впадиной*. Легко подметить, что волна характеризуется периодической сменой гребней и впадин. Если встречаются две волны

(если, например, мы с вами бросаем камни в озеро недалеко друг от друга), то при их наложении возникает важное явление, называемое *интерференцией* (см. рис. 4.2а). Если в каком-то месте озера встречаются гребни волн, то, складываясь, они усиливают друг друга, из-за чего уровень воды в этом месте становится ещё выше. Аналогично, когда накладываются друг на друга впадины волн, они также усиливают друг друга, из-за чего уровень воды в месте пересечения двух впадин ещё больше понижается, становясь равным сумме глубин двух впадин. А вот если гребень одной волны встречается с впадиной другой, то они гасят друг друга, причём гашение будет полным, если высота гребня первой волны совпадает с глубиной впадины второй волны, и тогда уровень поверхности воды в этом месте вообще не изменится.



a)

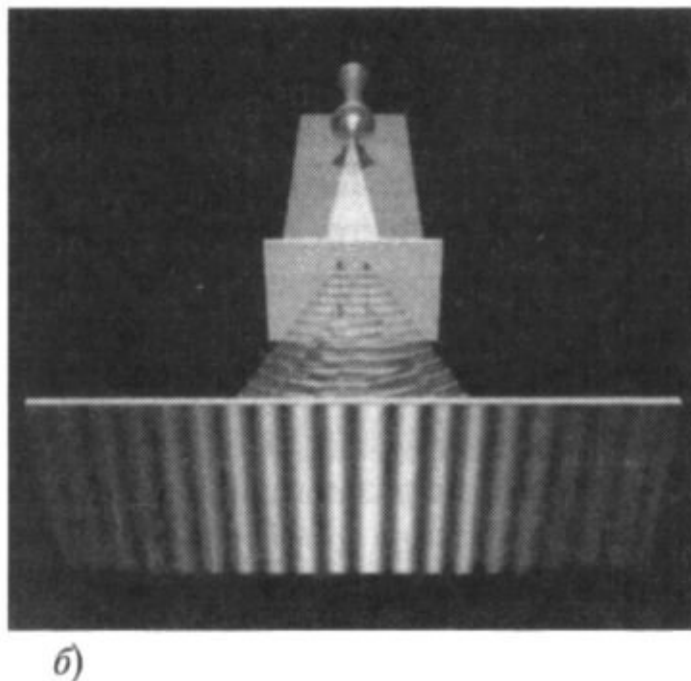


Рис. 4.2. (а) При наложении волн на поверхности воды возникает интерференционная картина. (б) При наложении световых волн тоже возникает интерференционная картина

На основе того же принципа можно объяснить картину, возникающую при прохождении света лазера через две щели. Свет является электромагнитной волной; проходя через две щели, он разделяется на две волны, идущие к экрану. Волны света интерферируют друг с другом подобно волнам на поверхности воды. Если в какой-то точке экрана пересекаются два гребня или две впадины световых волн, то эта точка выглядит яркой; а вот если гребень одной волны пересекается с впадиной другой, то точка экрана будет тёмной. Это и показано на рис. 4.2б.

Разумеется, волны могут накладываться друг на друга не только своими гребнями и впадинами, но возможны и различные промежуточные случаи. Математический анализ явления показывает, что должна возникать чередка тёмных и светлых полос, показанная на рис. 4.1. Это служит явным признаком того, что свет является волной, — очень важный вывод, поскольку вопрос о природе света горячо обсуждался ещё со времён Ньютона, который считал, что свет является не волной, а потоком частиц (мы поговорим об этом подробнее в своё время). Более того, этот анализ равным образом применим к *любым* видам волн (будь то световые волны, волны на поверхности воды, звуковые волны или какие угодно другие), и

поэтому интерференционные картины служат своеобразной «лакмусовой бумажкой»: будьте уверены, что имеете дело с волной, если на экране, расположенном за двумя щелями с правильно подобранным расстоянием между ними (определяемым расстоянием между гребнями и впадинами волны), вы получаете картину, подобную изображённой на рис. 4.1 (с яркими и тёмными областями, представляющими высокую и низкую интенсивности волн).

В 1927 г. Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер направили пучок электронов — частиц, не имевших, казалось бы, никакого отношения к волнам, — на кристалл никеля. Детали нам не важны, но существенно, что этот эксперимент в общем эквивалентен прохождению пучка электронов через две щели. Электроны, проходившие через кристалл, попадали на фосфоресцирующий экран, от соударения с которым возникала миниатюрная вспышка (из такого же рода вспышек формируется картинка на экране телевизоров с электронно-лучевой трубкой). Результаты эксперимента оказались ошеломляющими. Если считать электроны маленькими шариками или пулями, то естественно ожидать, что получится картинка, подобная изображённой на рис. 4.3а (две яркие полосы напротив двух щелей). Но в эксперименте Дэвиссона и Джермера обнаружилось совсем не то. Данные их эксперимента дали интерференционную картину, характерную для волн (что схематически показано на рис. 4.3б). Дэвиссон и Джермер наткнулись на ту самую «лакмусовую бумажку». *Они показали, что пучок электронов, которые являются частицами, неожиданно должен быть и некоторого рода волной.*

Однако, поразмыслив, можно подумать, что в этом нет ничего удивительного. Вода состоит из молекул H_2O , и волны на поверхности воды возникают, когда группы молекул двигаются согласованным образом. Одна группа молекул H_2O где-то двигается вверх, тогда как другая группа двигается вниз в другом месте. Так что можно было бы подумать, что результаты, отражённые на рис. 4.3, показывают: электроны, подобно молекулам H_2O , при определённых условиях могут двигаться согласованно, порождая в целом, на макроскопическом уровне, картину, характерную для волнового движения. Хотя на первый взгляд такое предположение может показаться разумным, но реальность оказывается гораздо более неожиданной.

Изначально мы предположили, что электронный луч из электронной пушки на рис. 4.3 бьёт непрерывно. Но мы можем так отрегулировать

пушку, что ежесекундно она будет испускать всё меньше и меньше электронов и таким путём можем опустить её скорострельность до уровня, скажем, всего один электрон за десять секунд. Набравшись терпения, мы можем провести этот эксперимент в течение долгого времени и зарегистрировать места соударений каждого отдельного электрона, прошедшего через щели. На рис. 4.4 *a–в* отражены результаты эксперимента после часа, половины дня и целого дня наблюдений соответственно. В 20-х гг. прошлого века такие картины потрясли основания физики. Мы видим, что даже отдельные электроны, проходящие через щели независимо друг от друга, порождают интерференционную картину, характерную для волнового движения.

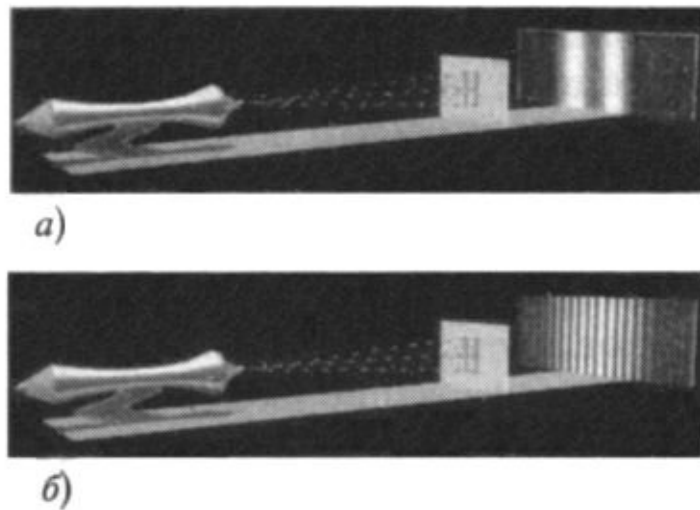
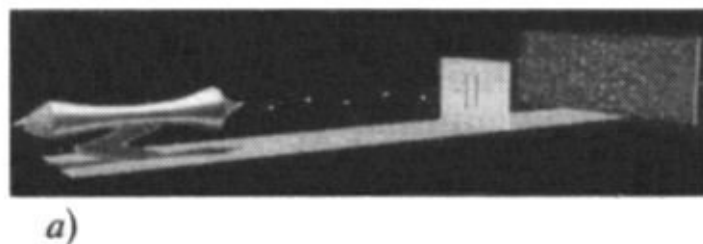


Рис. 4.3. (а) Классическая физика утверждает, что пучок электронов, пройдя через две щели в установленной на их пути преграде, должен оставить на экране две ярких полосы напротив щелей. (б) Эксперимент же подтверждает предсказание квантовой физики: электроны порождают интерференционную картину, что свидетельствует об их волновой природе



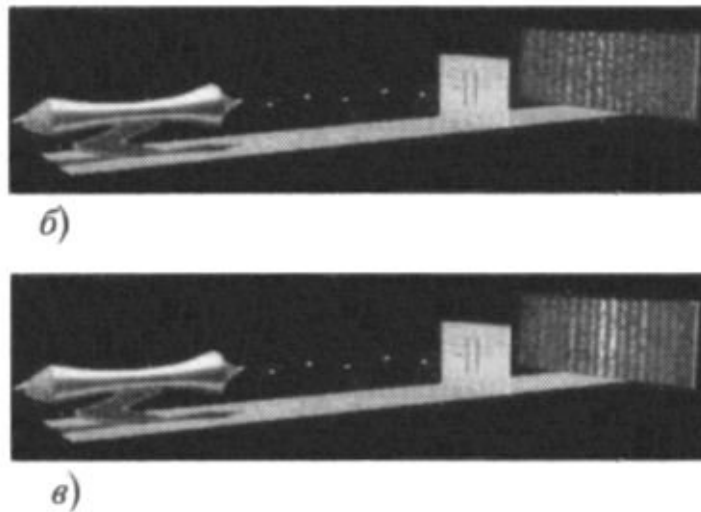


Рис. 4.4. Электроны, испускаемые электронной пушкой поодиночке в сторону щелей, создают интерференционную картину точка за точкой. На рис. (а)–(в) отражено формирование картины с течением времени

Это похоже на то, как если бы *отдельная* молекула H_2O могла вести себя подобно целой волне. Но как такое может быть? Волновое движение кажется коллективным свойством, которым не обладают отдельные составляющие. Если зрители на стадионе каждые несколько минут вскакивают со своего места и опускаются обратно независимо друг от друга, то волна *не* возникнет. Более того, кажется, что для создания интерференционной картины волна, испущенная *из одного* места, должна накладываться на волну, испущенную *из другого* места. То есть какое вообще отношение понятие интерференции может иметь к отдельной индивидуальной частице? Тем не менее, как свидетельствует интерференционная картина на рис. 4.4, хотя электроны и являются мельчайшими частицами материи, каждый из них по отдельности имеет волновой характер.

Вероятность и законы физики

Если отдельный электрон является также волной, то что же колеблется? Эрвин Шрёдингер предложил первую догадку: возможно, субстанция, из которого сделаны электроны, может быть размазана в пространстве, и колеблется именно эта размазанная электронная

субстанция. С этой точки зрения электрон как частица должен быть резким сгущением в электронном тумане. Однако было быстро осознано, что такое предположение не может быть верным, поскольку даже волна с резким пиком — подобная гигантской приливной волне — в конце концов расплывается. А если электронная волна расплывётся, то можно было бы обнаружить части заряда или массы одного и того же электрона в совершенно разных местах. Но такого никогда не наблюдается. Если мы обнаруживаем электрон, то всегда вся его масса и весь его заряд оказываются сконцентрированными в одной микроскопической области, практически в точке. В 1927 г. Макс Борн выдвинул другое предположение, оказавшееся решительным шагом, позволившим физикам войти в совершенно новую область. Он заявил, что волна — это не размазанный электрон или что-либо, с чем ранее сталкивались в науке. Эта волна, предположил Борн, является волной *вероятности*.

Чтобы понять, что это значит, представьте себе моментальный снимок волны на поверхности воды: на этом снимке видны области высокой интенсивности (вблизи гребней и впадин) и слабой интенсивности (вблизи плавного перехода от гребней к впадинам). Чем выше интенсивность, с тем большей силой волна может качнуть корабль или обрушиться на побережье. Волны вероятности в представлении Борна тоже имеют области сильной и слабой интенсивности, однако смысл, который он приписал такой волне, является неожиданным: *амплитуда волны в данной точке пространства пропорциональна вероятности обнаружения электрона в этой точке пространства*. Более всего вероятно обнаружить электрон в областях с большой амплитудой волны, менее вероятно — в областях с малой амплитудой. Если же амплитуда равна нулю в какой-то области пространства, то там электрон никогда не будет обнаружен.

На рис. 4.5 показан «моментальный снимок» волны вероятности с пометками, соответствующими интерпретации Борна. В отличие от случая волны на поверхности воды, однако, этот снимок не может быть сделан фотоаппаратом. Никто никогда непосредственно не видел волны вероятности, да и никогда не увидит, согласно представлениям общепринятой квантовой механики. Такая картинка получается в результате решения математических уравнений (выведенных Шрёдингером, Нильсом Бором, Вернером Гейзенбергом, Полем Дираком и другими физиками). Теоретические расчёты можно сравнить с экспериментальными данными следующим образом. Вычислив волну вероятности электрона в желаемых условиях, мы затем воспроизводим в эксперименте эти условия и измеряем положение электрона; затем этот же

эксперимент мы повторяем снова и снова, каждый раз записывая измеренное положение электрона. *В отличие от того, что ожидал бы Ньютон, идентичные эксперименты при идентичных начальных условиях не обязательно ведут к идентичным результатам.* Вместо этого измерения дают самые разные положения электрона. Иногда мы обнаруживаем электрон здесь, иногда — там, и время от времени — совсем далеко. Если квантовая механика верна, то частота обнаружения электрона в данной точке пространства должна быть пропорциональна амплитуде (точнее, квадрату амплитуды) вычисленной нами волны вероятности в этой точке. За восемьдесят лет экспериментальных проверок предсказания квантовой механики сбывались с впечатляющей точностью.

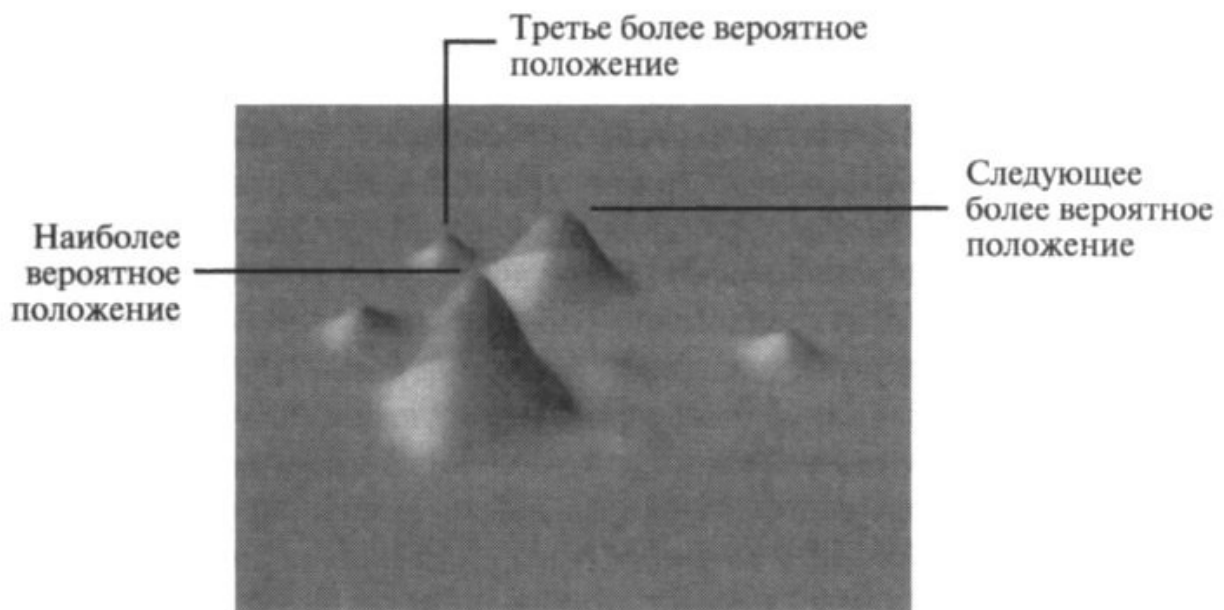


Рис. 4.5. Волна вероятности частицы, такой как электрон, говорит о том, каковы шансы обнаружить эту частицу в том или ином месте

На рис. 4.5 показана только часть волны вероятности: согласно квантовой механике любая волна вероятности простирается по всему пространству, через всю Вселенную.^[45] Однако во многих случаях волна вероятности быстро спадает практически до нуля вне некоторой малой области, указывая на подавляющую вероятность обнаружить частицу именно в этой области. В этом случае часть волны вероятности, не уместившаяся на рис. 4.5 (та часть, что простирается по всей Вселенной) похожа на волну возле краёв этого рисунка: она такая же плоская и близкая

к нулю. Тем не менее, если волна вероятности где-то в галактике Андромеды не точно равна нулю, то всегда есть шанс — пусть даже исчезающе малый, но всё же реальный — обнаружить электрон именно там.

Таким образом, успехи квантовой механики заставляют нас принять, что электрон — составляющая материи, которую мы обычно рассматриваем как занимающую ничтожно малую область пространства (практически точку) — описывается также на языке волны, простирающейся, напротив, на всю Вселенную. Более того, согласно квантовой механике этот корпускулярно-волновой дуализм присущ всем составляющим частям природы, не только электронам: протоны и нейтроны также имеют как корпускулярное, так и волновое описание, а в экспериментах, проведённых в самом начале XX в., было установлено, что даже свет (который явно ведёт себя как волна, на что указывает рис. 4.1) также может быть описан в терминах частиц, «маленьких сгустков света», названных фотонами, которые уже упоминались ранее.^[46] Привычные электромагнитные волны, испускаемые, например, стоваттной лампочкой, могут быть с равным успехом описаны в терминах примерно ста миллиардов миллиардов фотонов, испускаемых лампочкой каждую секунду. Мы усвоили, что в квантовом мире любой объект имеет как корпускулярные, так и волновые свойства.

За последние восемь десятилетий вездесущность и полезность представления о квантово-механических вероятностных волнах для предсказания и объяснения экспериментальных результатов была установлена с полной несомненностью. Однако до сих пор ещё нет общего согласия в том, что же в действительности представляют собой квантово-механические волны вероятности. Следует ли нам говорить, что волна вероятности электрона и *есть* сам электрон, или же она *связана* с электроном, или же она является *математическим приёмом* для описания движения электрона, или же она *отражает то, что мы можем знать* об электроне — всё это ещё обсуждается. Ясно лишь то, что посредством этих волн квантовая механика вводит понятие вероятности в законы физики, причём таким способом, который никто не мог предвидеть. Метеорологи взяли на вооружение вероятность для предсказания возможности дождя. Казино используют вероятности для предсказания возможности выброса комбинации «глаза змеи» при игре в кости. В этих примерах вероятность задействована лишь постольку, поскольку мы не имеем всей информации, необходимой для точного предсказания. Согласно Ньютону, знай мы полностью все погодные условия (положения и скорости всех объектов,

влияющих на погоду), мы смогли бы точно предсказать (если бы хватило вычислительной мощности), будет ли дождь завтра в 16:07; если бы мы знали все физические детали, относящиеся к игре в кости (точную форму и материал игральные кости, их скорость и ориентацию в момент их выброса, материал стола и его поверхности и т. д.), мы смогли бы точно предсказать, как лягут кости. Но поскольку на практике мы не можем собрать всю эту информацию (а даже если бы и могли, то всё равно наши компьютеры ещё не достаточно мощны, чтобы справиться с вычислениями, необходимыми для таких предсказаний), то мы опускаем планку наших притязаний и предсказываем только вероятность реализации какой-то погоды или определённого исхода в казино, делая правдоподобные предположения о данных, которых у нас нет.

Вероятность, введённая в квантовой механике, носит иной, более фундаментальный характер. Согласно квантовой механике, независимо от качества сбора данных или повышения мощности компьютеров, самое лучшее, что мы можем сделать, — это предсказать только вероятность того или иного исхода. Самое лучшее, что мы когда-либо сможем сделать, — это предсказать только вероятность того, что электрон или протон или нейтрон или любой другой объект микромира будет обнаружен здесь или там. В микрокосмосе царит вероятность.

В заключение вернёмся к нашему примеру, отражённому на рис. 4.4. Теперь ясно, как с точки зрения квантовой механики объяснить картину интерференции, даваемую одиночными электронами. Каждый электрон описывается своей волной вероятности. При испускании электрона его волна вероятности проходит через обе щели. И подобно световым волнам и волнам на поверхности воды, волны вероятности, испускаемые двумя щелями, накладываются друг на друга. В некоторых точках экрана эти две волны вероятности усиливают друг друга, и результирующая интенсивность велика. В других точках волны частично гасятся, и поэтому интенсивность мала. В третьих точках гребни и впадины волн полностью гасят друг друга, так что итоговая амплитуда в точности равна нулю. В соответствии с этим экран разбивается на точки, куда электрон попадёт с очень высокой вероятностью, на точки, где его ждут меньше, и на точки, попасть в которые у электрона совсем нет шансов. С течением времени попадающие в экран электроны формируют картину, отвечающую распределению вероятности, так что на экране некоторые области получают более яркими, другие — менее, а третьи — совсем тёмными. Математический анализ показывает, что эти светлые и тёмные области будут выглядеть в точности так, как на рис. 4.4.

Эйнштейн и квантовая механика

Из-за своей неотъемлемой вероятностной природы квантовая механика резко отличается от любого из предшествовавших фундаментальных описаний Вселенной, как качественных, так и количественных. Всё последнее столетие с момента появления квантовой механики физики старались соединить эту странную и неожиданную теорию с общепринятыми взглядами на мир; эти попытки всё ещё продолжаются. Проблема заключается в согласовании макроскопического опыта повседневной жизни с микроскопической реальностью, вскрытой квантовой механикой. Мы привыкли жить в мире, в котором, как это общеизвестно, не исключены превратности экономического или политического рода, но который выглядит стабильным и надёжным, по крайней мере пока речь идёт о его физических свойствах. Вы не тревожитесь о том, что молекулы воздуха, которым вы сейчас дышите, внезапно исчезнут, проявляя свои квантовые волновые свойства, и материализуются, скажем, на обратной стороне Луны. И вы правильно делаете, что не беспокоитесь о таком исходе, поскольку согласно квантовой механике вероятность такого исхода смехотворна мала, хотя и не в точности равна нулю. Но из-за чего она столь мала?

Грубо говоря, на это есть две причины. Во-первых, по меркам микромира Луна чудовищно далека, а, как уже говорилось, во многих случаях (хотя и не во всех) квантовые уравнения показывают, что волна вероятности обычно имеет заметную амплитуду в некоторой малой области пространства и быстро стремится к нулю при удалении от этой области (как на рис. 4.5). Так что вероятность того, что даже отдельный электрон, находящийся с вами в одном помещении (например, один из тех, что вы только что выдохнули), будет обнаружен через одну-две секунды на обратной стороне Луны, хотя и не нулевая, но чрезвычайно мала. Настолько мала, что у вас гораздо больше шансов заключить брак с Николь Кидман или Антонио Бандерасом. Во-вторых, воздух вашей комнаты состоит из *уймы* электронов, равно как и протонов и нейтронов. Вероятность того, что *все* эти частицы сделают то, что чрезвычайно маловероятно даже для одной из них, настолько мала, что и не стоит думать об этом. Вы скорее не только женитесь на любимой кинозвезде, но и будете выигрывать каждую недельную лотерею в течение такого промежутка времени, по сравнению с которым текущий возраст Вселенной покажется лишь мигом.

Это как-то объясняет то, почему в повседневной жизни мы непосредственно не сталкиваемся с вероятностными аспектами квантовой механики. Тем не менее, поскольку эксперименты подтверждают, что квантовая механика действительно описывает фундаментальную физику, то это прямо затрагивает наши представления о реальности. Эйнштейн, в частности, был глубоко обеспокоен вероятностным характером квантовой теории. Он подчёркивал снова и снова, что делом физики является точное определение того, что происходило, что происходит и что произойдёт в мире вокруг нас. Физики не букмекеры, и не дело физики просчитывать шансы. Но Эйнштейн не мог отрицать, что квантовая механика поразительно успешна в объяснении и предсказании того, что экспериментально наблюдается в микромире, пусть даже на статистическом уровне. Поэтому вместо того чтобы пытаться показать несостоятельность квантовой механики, что выглядело бы глупой затеей в свете беспрецедентных успехов теории, Эйнштейн потратил много усилий на попытки показать, что квантовая механика не является последним словом в том, как работает Вселенная. Хотя Эйнштейн и не мог произнести это последнее слово, но он хотел убедить всех, что должно быть более глубокое и менее странное описание Вселенной, и это описание ещё должно быть найдено.

В течение многих лет Эйнштейн ставил всё более изощрённые вопросы, нацеленные на то, чтобы вскрыть пробелы в структуре квантовой механики. Один из таких вопросов, поставленный в 1927 г. на Пятой физической конференции Сольвеевского института,^[47] опирался на тот факт, что даже хотя вероятностная волна электрона и может выглядеть так, как на рис. 4.5, но когда бы мы ни определяли местонахождение электрона, мы всегда обнаруживаем его в определённом месте, хотя это место всякий раз меняется. Эйнштейн задал вопрос: не означает ли это, что волна вероятности является просто временной заменой более точного описания, которое ещё предстоит открыть и которое будет точно предсказывать местоположение электрона? В конце концов, если электрон обнаружен в точке X , не означает ли это в действительности, что он *был* в точке X или *очень близко* к ней перед своим обнаружением? И если это так, — продолжал Эйнштейн, — не означает ли это, что зависимость квантовой механики от волны вероятности — волны, которая говорит, что с некоторой вероятностью электрон мог находиться далеко от точки X , — свидетельствует о неадекватности теории для описания истинной фундаментальной реальности?

Позиция Эйнштейна проста и убедительна. Что может быть более

естественным, чем ожидать, что частица находилась именно там, где она была обнаружена мгновением позже, или по крайней мере близко от этого места? Если это так, то более глубокое понимание физики должно предоставить *эту* информацию и тем самым покончить с более грубым вероятностным описанием. Но датский физик Нильс Бор и окружавшие его защитники квантовой механики не были согласны с этим. Подобные аргументы, — парировали они, — основаны на привычном мышлении, в рамках которого каждый электрон должен придерживаться своей определённой траектории движения, по которой он скитается туда и обратно. Но это утверждение полностью противоречит рис. 4.4, ведь если каждый электрон действительно придерживается одной определённой траектории — как в классическом образе пули, выпущенной из ружья, — то чем же объяснить наблюдаемую интерференционную картину: что и с чем будет интерферировать? Отдельные пули, выстреливаемые одна за одной из одного ружья, не могут, несомненно, интерферировать друг с другом, так что если электроны движутся как пуля, то чем объяснять картину на рис. 4.4?

Согласно Бору и Копенгагенской интерпретации квантовой механики, которую он яростно отстаивал, *до измерения положения электрона бессмысленно даже спрашивать, где он находится*. Он не имеет определённого положения. В волне вероятности закодирована вероятность того, что в ходе опыта электрон будет обнаружен здесь или там, и это *действительно* всё, что можно сказать о его положении. Больше сказать нечего. Электрон имеет определённое положение в обычном интуитивном смысле только в момент, когда мы «смотрим» на него — т. е. когда измеряем его положение, — точно определяя, где он находится. Но до (и после) этого всё, что электрон имеет, — это возможные положения, описываемые волной вероятности, которая, как и всякая волна, подвержена интерференционным эффектам. Дело обстоит не так, как будто электрон имеет определённое положение, но мы его не знаем, пока не проведём свои измерения. Вопреки тому, что вы ожидали, электрон просто *не имеет* определённого положения до проведения измерения.

Это очень странная реальность. С этой точки зрения, измеряя положение электрона, мы не измеряем объективную, независимо ни о чего существующую характеристику реальности. Скорее, акт измерения глубоко сплетён с созданием самой реальности, которая наблюдается. Перенося это утверждение с электронов на повседневную жизнь, Эйнштейн саркастически заметил: «Вы действительно верите в то, что Луны нет на небе, пока мы не взглянем на неё?» Адепты квантовой механики ответили

на это парафразом старой пословицы про дерево, падающее в лесу:^[25] если никто не смотрит на Луну — если никто не «измеряет её положение, глядя на неё» — то для нас нет способа узнать, есть ли она на месте, так что вопрос теряет смысл. Эйнштейн нашёл это глубоко неудовлетворительным. Это в корне расходилось с его концепцией реальности; он твёрдо верил, что Луна всегда на своём месте, независимо от того, смотрит ли на неё кто-нибудь или нет. Но сторонники квантовой механики остались при своих убеждениях.

Второй вопрос Эйнштейна, поставленный в 1930 г. на Сольвеевской конференции, вплотную примыкал к первому. Эйнштейн описал гипотетический прибор, который (через хитроумную комбинацию линейки, часов и устройства, напоминающего затвор фотоаппарата), как казалось, устанавливал, что частица вроде электрона *должна* иметь определённые характеристики — ещё до их измерения, — чего не может быть согласно квантовой механике. Детали механизма несущественны, но исход спора очень ироничен. Изучив возражение Эйнштейна, Бор был совершенно выбит из колеи — сначала аргументы Эйнштейна показались ему безукоризненными. Но за считанные дни Бор оправился и полностью опроверг аргументы Эйнштейна. И самым удивительным оказалось то, что опровержение Бора основывалось на общей теории относительности! Бор понял, что Эйнштейн упустил из вида собственное открытие искажения времени гравитацией — что показания часов зависят от гравитационного поля, в котором они находятся. С учётом этой поправки Эйнштейн вынужден был признать, что его выводы ложатся прямо в русло ортодоксальной квантовой теории.

Несмотря на свои поражения в споре, Эйнштейн остался глубоко неудовлетворён квантовой механикой. В последующие годы он продолжал атаковать Бора и его коллег, выдвигая один за другим новые контраргументы. Особенным нападкам он подвергал так называемый *принцип неопределённости*, прямое следствие квантовой механики, сформулированный в 1927 г. Вернером Гейзенбергом.

Гейзенберг и принцип неопределённости

Принцип неопределённости даёт количественную меру того, насколько тесно вероятность вплетена в ткань квантовой Вселенной. Чтобы понять это, представим себе комплексные обеды, предлагаемые по одинаковой цене в некоторых китайских ресторанах. Перечень блюд разбит на две

колонки, *A* и *B*, и если, например, вы заказали первое блюдо из колонки *A*, вы уже не можете заказать первое блюдо из колонки *B*; если вы заказали второе блюдо из колонки *A*, вы уже не можете заказать второе блюдо из колонки *B* и т. д. Таким путём ресторан устанавливает диетический дуализм, кулинарную дополнительную (нацеленную в данном случае на то, чтобы вы не выбрали все самые дорогие блюда). Заказывая комплексный обед, вы можете выбрать либо утку по-пекински, либо лобстера по-кантонски, но не то и другое вместе.

Принцип неопределённости Гейзенберга работает сходным образом. Он утверждает, грубо говоря, что физические характеристики объектов микромира (положения частиц, их скорости, энергии, моменты импульса и т. д.) можно разделить на два списка, *A* и *B*. И, как установил Гейзенберг, знание первой характеристики из списка *A* в корне ограничивает вашу возможность установить величину первой характеристики из списка *B*; знание второй характеристики из списка *A* в корне ограничивает вашу возможность установить величину второй характеристики из списка *B* и т. д. Более того, подобно тому как если можно было бы заказывать обеды, содержащего немного утки по-пекински и немного лобстера по-кантонски, но не превышая при этом установленной цены комплексного обеда, точно так же чем точнее вы знаете какую-то характеристику из первого списка, тем менее точно вы будете знать величину соответствующей характеристики из второго списка. Принципиальная невозможность определить одновременно все характеристики из обоих списков (т. е. точно определить величины всех характеристик микромира) и есть та неопределённость, что вскрывается принципом Гейзенберга.

Например, чем точнее вы знаете, где находится частица, тем менее точно вы можете установить её скорость. Аналогично, чем точнее вы знаете, с какой скоростью движется частица, тем с меньшей точностью вы можете определить, где она находится. Таким путём квантовая теория устанавливает собственный дуализм: вы можете точно определить некоторые физические характеристики микромира, но тем самым вы лишаетесь возможности точно установить ряд других характеристик, дополнительных первым.

Чтобы понять, почему это так, посмотрим, какую картину рисовал сам Гейзенберг; эта картина достаточно груба и неполна в отдельных аспектах, но полезна с точки зрения интуитивного понимания. Когда мы измеряем положение любого объекта, мы тем или иным образом взаимодействуем с ним. Если мы ищем выключатель в тёмной комнате, то узнаём о своей находке на ощупь. Когда летучая мышь охотится, она испускает

ультразвуковые волны и по их отражению судит об окружающем её пространстве. Чаще всего мы определяем положение объекта, глядя на него — воспринимая свет, отражённый от объекта и попадающий на сетчатку наших глаз. Самое главное в этих примерах заключается в том, что эти взаимодействия влияют не только на нас, но и на объект, положение которого определяется. Даже свет, отражаясь от объекта, немного толкает его. Конечно, на вещи, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, вроде книги в ваших руках или часов на стене, микроскопический толчок от отражённого света не оказывает сколько-нибудь заметного влияния. Но когда свет сталкивается с элементарной частицей вроде электрона, он оказывает на неё большое воздействие: отскакивая от электрона, свет изменяет его скорость примерно так же, как ваше движение меняется под порывом сильного ветра, налетевшего из-за угла улицы. В действительности, чем точнее вы хотите определить положение электрона, тем более сфокусированным и мощным должен быть луч света и тем большее влияние он окажет на движение электрона.

Значит, если вы с высокой точностью измеряете положение электрона, вы неизбежно портите собственный эксперимент: акт точного измерения положения сильно изменяет скорость электрона. Поэтому вы можете точно узнать, где находится электрон, но не можете точно узнать, с какой скоростью он в этот момент двигается. И наоборот, вы можете точно измерить, с какой скоростью движется электрон, но, делая это, вы неизбежно лишаете себя возможности точно определить его положение в тот же момент времени. Природа имеет свой предел точности, накладывающий ограничение на точность определения дополнительных друг другу характеристик. И хотя мы всё время говорили об электронах, принцип неопределённости носит всеобщий характер: он применим ко всему.

В повседневной жизни мы запросто говорим о том, к примеру, что автомобиль проехал дорожный знак (положение) на скорости 90 км/ч (скорость), одновременно определяя две эти характеристики. В действительности квантовая механика говорит о том, что такое утверждение не имеет точного смысла, поскольку невозможно одновременно измерить и определённое положение и определённую скорость. Причина, по которой мы не считаемся с такой неточностью, состоит в том, что на повседневном уровне степень неопределённости ничтожна и практически всегда незаметна. Принцип Гейзенберга не просто декларирует неопределённость, но и точно определяет минимальную величину неопределённости в любой ситуации. Если вы примените

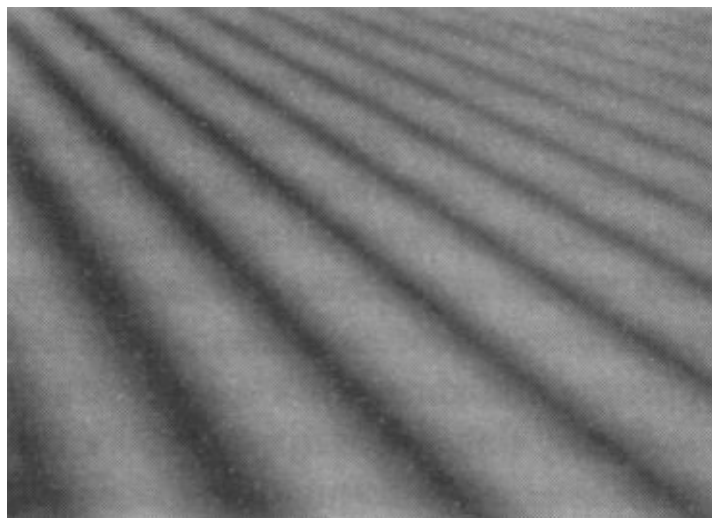


Рис. 4.6. Волна вероятности с точно повторяющейся последовательностью одинаковых гребней и впадин соответствует частице с точно определённой скоростью. Но поскольку все гребни и впадины совершенно одинаковы, то положение частицы оказывается совершенно неопределённым. С равной вероятностью она может быть где угодно

Аналогичное рассуждение применимо ко всем другим формам волн, хотя конкретные детали могут быть более сложными. В целом урок понятен: в квантовой механике неопределённость просто существует, и всё.

Эйнштейн, неопределённость и вопрос реальности

Важный вопрос, который уже мог прийти вам на ум, заключается в том, отражает ли принцип неопределённости то, что мы можем знать о реальности, или саму реальность? Имеют ли все объекты Вселенной на самом деле определённое положение и скорость, как мы себе обычно представляем в повседневной жизни (взлетающий бейсбольный мяч, бегун на дорожке, подсолнух, медленно поворачивающийся вслед за Солнцем), но квантовая неопределённость говорит нам, что в принципе невозможно знать эти характеристики одновременно? Или же квантовая неопределённость полностью разрушает наши классические представления, утверждая, что неверен классический перечень атрибутов, приписываемый нами реальности, и начинающийся с положения и скорости объектов? Говорит ли квантовая неопределённость о том, что в любой заданный момент времени частицы просто не имеют определённого

положения и определённой скорости?

Для Бора эта проблема была чем-то вроде коана дзен-буддизма.^[26] Физика имеет дело только с тем, что можно измерить. С точки зрения физики это и *есть* реальность. Пытаться использовать физику для анализа «более глубокой» реальности, находящейся за пределами того, что мы можем знать посредством измерений, — это всё равно, что задействовать физику для анализа звука хлопка одной ладони. Но в 1935 г. Эйнштейн вместе с двумя коллегами, Борисом Подольским и Натаном Розеном, поднял эту проблему таким убедительным и хитрым образом, что начинавшееся тогда как хлопок одной ладони отозвалось через пятьдесят лет раскатом грома, возвестившим о начале гораздо большего переворота в нашем понимании реальности, чем представлялось когда-либо даже Эйнштейну.

Целью статьи Эйнштейна–Подольского–Розена было показать, что хотя квантовая механика, безусловно, успешно предсказывает и объясняет результаты измерений, но она не может быть последним словом в физике микромира. Их стратегия была проста: они хотели показать, что каждая частица на самом деле имеет определённое положение и определённую скорость в любой заданный момент времени, откуда следовало бы, что принцип неопределённости выражает фундаментальную ограниченность подхода квантовой механики. Если каждая частица занимает определённое положение и имеет определённую скорость, но квантовая механика не в состоянии определить их одновременно, значит она даёт лишь частичное описание Вселенной. Поэтому квантовая механика является неполной теорией физической реальности и, возможно, лишь верстовым столбом на пути к более глубокой теории, которую ещё предстоит открыть. В действительности, как мы увидим, они заложили фундамент для демонстрации кое-чего ещё более грандиозного: нелокальности квантового мира.

Работа Эйнштейна, Подольского и Розена (ЭПР) была отчасти вызвана грубым объяснением, которое дал Гейзенберг принципу неопределённости: измеряя положение чего-либо, вы неизбежно вносите возмущение в движение и, тем самым, лишаете себя возможности одновременно точно определить скорость этого объекта. Хотя, как мы видели, квантовая неопределённость носит более общий характер, чем это объясняется с помощью «возмущения», Эйнштейн, Подольский и Розен изобрели нечто, что, должно было бы убедительно и хитроумно устранить *любой* источник неопределённости. Что если бы мы смогли косвенно получить точную информацию как о положении, так и скорости частицы, не вступая с ней

контакт? — предположили они. Используя классическую аналогию, представим, к примеру, что Род и Тодд Фландерсы^[27] решили прогуляться по только что возникшей в Спрингфилде ядерной пустыне. Они встали спиной к спине в центре пустыни и договорились идти прямо вперёд в противоположных направлениях и с одинаковой скоростью. Затем представьте, что девять часов спустя их отец, Нед, вернувшись после своего восхождения на Пик Спрингфилда, откуда он заметил, где находится Род, бежит к нему и с тревогой спрашивает, где же Тодд. К этому времени Тодд ушёл уже далеко, но, расспросив Рода и зная, где находится Род, Нед тем не менее может многое узнать о Тодде. Если Род находится точно в 45 км к востоку от стартовой точки, то Тодд должен находиться точно в 45 км к западу от неё. Если Род шагает со скоростью точно 5 км/ч на восток, то Тодд должен шагать точно со скоростью 5 км/ч на запад. Так что даже если Тодда и Неда разделяет 90 км, Нед может определить положение и скорость Тодда, пусть и косвенно.

Эйнштейн с коллегами применил аналогичный подход к квантовой области. При некоторых хорошо изученных физических процессах из одного места могут испускаться две частицы с характеристиками, которые соотносятся примерно тем же способом, как движение Рода и Тодда. Например, если одна частица распадается на две частицы одинаковой массы, разлетающиеся в противоположных направлениях (подобно тому как взрыв разбрасывает два осколка в разные стороны), что является обычным делом в царстве физики субатомных частиц, то скорости этих двух частиц будут равными и противоположными. Более того, положения этих частиц будут также тесно связаны друг с другом, и для простоты можно считать, что они всегда находятся на одинаковом расстоянии от своего места возникновения.

Важное различие между классическим примером с Родом и Тоддом и квантовым описанием двух частиц состоит в том, что, хотя мы можем наверняка сказать, что есть точная связь между скоростями двух частиц, — если наблюдением установлено, что одна двигается влево с какой-то скоростью, то вторая обязательно будет двигаться вправо с той же скоростью, — однако мы не можем предсказать, с какой именно скоростью двигаются частицы. Используя законы квантовой физики, мы можем в лучшем случае лишь предсказать вероятность, с которой частицы имеют ту или иную скорость. Аналогично, хотя мы можем наверняка сказать, что есть точная связь между положениями двух частиц, — если измерение показало, что одна находится в таком-то месте в данный момент, то вторая обязательно будет находиться на том же расстоянии, но в противоположном

направлении от начальной точки, — но мы не можем предсказать, где именно находится каждая частица. В лучшем случае мы можем предсказать лишь вероятность того, что одна из частиц находится в том или ином месте. Таким образом, хотя квантовая механика не даёт точного ответа на вопрос, где находятся частицы и какова их скорость, но в определённых условиях она делает точные утверждения, касающиеся *взаимосвязи* скоростей и положений частиц.

Эйнштейн, Подольский и Розен попытались использовать эти взаимосвязи, чтобы показать, что каждая из частиц на самом деле имеет определённое положение и определённую скорость в любой заданный момент времени. И вот что они предложили: представьте, что вы измеряете положение летящей вправо частицы и тем самым косвенно узнаете положение летящей влево частицы. ЭПР утверждают, что поскольку вы ничего, абсолютно ничего не делали с летящей влево частицей, она *должна* была иметь это положение, и вы определили его, хотя и косвенно. Затем ЭПР замечают, что вместо измерения положения летящей вправо частицы вы могли бы измерить её скорость. В этом случае вы бы косвенно определили скорость летящей влево частицы, никак её не затронув. И опять же, — утверждают ЭПР, — поскольку вы ничего, абсолютно ничего не делали с летящей влево частицей, то она должна иметь именно эту скорость, и вы определили эту скорость. Объединяя оба случая вместе — измерение, которое вы сделали, и измерение, которое вы *могли бы* сделать, — ЭПР заключают, что летящая влево частица имеет определённое положение и определённую скорость в любой заданный момент времени.

Поскольку это место тонкое и очень важное, позволю себе повторить сказанное немного другими словами. ЭПР утверждают, что измеряя характеристики летящей вправо частицы, вы никак не можете повлиять на летящую влево частицу, поскольку это отдельные, пространственно разделённые частицы. Летящая влево частица совершенно не ведает о том, что вы сделали или могли сделать с летящей вправо частицей. Во время проведения измерений эти частицы могли разделять метры, километры или световые годы, так что летящей влево частице всё равно, что вы делаете с правой. Значит, любая характеристика летящей влево частицы, которую вы в действительности узнали или в принципе могли узнать путём исследования летящей вправо частицы, должна иметь вполне *определённое и уже существующее* значение, совершенно независимо от ваших измерений. А поскольку, измерив положение правой частицы, вы узнаете положение левой частицы, а измерив скорость правой частицы, вы узнаете скорость левой частицы, то летящая влево частица в действительности

имеет и определённые положение, и определённую скорость. Конечно, всё это рассуждение может быть проведено и в том случае, если поменять роли частиц (и, фактически, до проведения измерения мы даже не можем сказать, какая частица летит влево, а какая вправо); следовательно, обе частицы имеют определённые положения и скорости.

Таким образом, — заключают ЭПР, — квантовая механика не полностью описывает реальность. Частицы имеют определённые положения и скорости, но квантово-механический принцип неопределённости показывает, что эти характеристики реальности находятся за пределами того, чем может оперировать теория. Если в соответствии с этим и в согласии с большинством других физиков вы верите, что полная теория природы должна описывать каждый атрибут реальности, то неспособность квантовой механики описывать одновременно положения и скорости частиц означает, что она упускает некоторые атрибуты и, следовательно, не является полной теорией; она не является последним словом. Вот что решительно отстаивали Эйнштейн, Подольский и Розен.

Квантовый отклик

Хотя ЭПР пришли к выводу, что каждая частица имеет определённое положение и скорость в любой заданный момент времени, отметим, что если вы последуете их процедуре, вы не сможете на самом деле определить обе эти характеристики. Выше я говорил, что вы могли бы решить измерить скорость летящей вправо частицы. Проведя это, вы бы внесли возмущение в её положение; с другой стороны, если вы бы решили измерить её положение, вы бы исказили её скорость. Если же вы не знаете этих характеристик для летящей вправо частицы, то не знаете их и для летящей влево частицы. Так что *нет противоречия с принципом неопределённости*: Эйнштейн с коллегами полностью отдавали себе отчёт, что они не смогли бы одновременно определить и положение и скорость любой данной частицы. Однако — и в этом вся суть — рассуждение ЭПР показывает, что каждая частица *имеет* определённые положение и скорость, даже если положение и скорость не определяются. Такой им виделась реальность, а теория, как они полагали, не может претендовать на полноту, если есть элементы реальности, которые она не может описать.

После небольшой интеллектуальной сумятицы в поисках ответа на это неожиданное рассуждение защитники квантовой механики прибегли к

своему обычному прагматическому подходу, ярко выраженному выдающимся физиком Вольфгангом Паули: «Не следует ломать себе голову над проблемой существования чего-либо, о чём невозможно узнать, как над старым вопросом, сколько ангелов может уместиться на кончике иглы»^[48]. Физика в целом и квантовая механика в частности могут иметь дело только с измеряемыми свойствами Вселенной. Всё иное находится просто за пределами физики. Если вы не можете измерить одновременно положение и скорость частицы, то нет смысла говорить о том, имеет ли она одновременно положение и скорость.

ЭПР не согласились с этим. Реальность, — настаивали они, — есть нечто большее, чем показания детекторов; реальность шире всей совокупности всех наблюдений в данный момент времени. Когда никто и ничто, совсем ничто, ни один прибор, ни одно устройство не «смотрит» на Луну, Луна тем не менее находится на своём месте. Они считали, что Луна всегда остаётся частью реальности.

В известном смысле это противостояние перекликается с дебатами между Ньютоном и Лейбницем по поводу реальности пространства. Может ли что-либо считаться реальным, если в действительности мы не можем ни прикоснуться к нему, ни увидеть его, ни каким-либо образом измерить его? В главе 2 рассказывалось, как ньютоновское ведро резко изменило характер споров о пространстве благодаря неожиданному наблюдению, что влияние пространства может быть обнаружено непосредственно, по искривлённой форме поверхности вращающейся воды. В 1964 г. одним ошеломляющим ударом, который один комментатор назвал «самым глубоким открытием в науке»^[49], ирландский физик Джон Белл перевёл в ту же плоскость дискуссию о квантовой реальности.

В следующих четырёх разделах мы тщательно и полно опишем открытие Белла, за исключением лишь некоторого количества технических деталей.^[28] Тем не менее, хотя наше рассуждение не бог весть какое изощрённое, оно включает в себя пару моментов, которые лучше описать сначала по отдельности, а затем связать воедино. Если в какой-то момент вы почувствуете, что с вас достаточно технических подробностей, смело перепрыгивайте на несколько страниц вперёд (в раздел «Нет дыма без огня»), где вы найдёте резюме и обсуждение выводов, вытекающих из открытия Белла.

Белл и спин

Джон Белл перевёл центральную идею статьи Эйнштейна–Подольского–Розена из разряда философских рассуждений в ранг вопросов, на которые можно ответить экспериментально. Неожиданно оказалось: всё, что требуется, — это рассмотреть ситуацию, где имеются не точно две характеристики (например, положение и скорость), которые квантовая механика запрещает определять одновременно. Белл показал, что если имеются три или более характеристики, которые одновременно подпадают под принцип неопределённости, — т. е., измеряя одну из них, вы неизбежно искажаете все остальные и уже не можете точно их определить, — тогда существует эксперимент, позволяющий определить, что такое реальность. Простейший пример такой ситуации включает так называемый *спин* частиц.

Начиная с 20-х гг. прошлого века физикам было известно, что спины частиц связаны, грубо говоря, с вращательным движением частиц, напоминающим вращение футбольного мяча, закрученного при ударе по воротам. Но в таком классическом образе теряется ряд существенных свойств этого квантово-механического явления, и для нас важнее всего два следующих момента. Первый заключается в том, что частицы (например, электроны и протоны) могут вращаться только по часовой стрелке или против часовой стрелки со всегда неизменной скоростью относительно любой выбранной оси; ось вращения частицы может менять направление, но скорость её вращения не может ни уменьшиться, ни увеличиться. Второй момент: квантовая неопределённость применительно к спину показывает, что точно так же, как невозможно одновременно определить положение и скорость частицы, так же невозможно одновременно определить спин частицы относительно более чем одной оси. Например, если футбольный мяч вращается относительно оси, ориентированной на северо-восток, то его спин распределён между северной и восточной осями — и в ходе соответствующего измерения можно определить, какая часть спина приходится на каждую из осей. Однако, измеряя спин электрона относительно произвольно выбранной оси, вы никогда не получите дробную величину. Это похоже на то, как если бы само измерение заставляло электрон собирать всё своё вращательное движение и направлять его вдоль выбранной оси по или против часовой стрелки. Более того, поскольку ваше измерение влияет на спин электрона, вы утрачиваете возможность определить, как перед измерением электрон вращался относительно горизонтальной или любой другой оси. Эти особенности квантово-механического спина трудно полностью обрисовать, и эта трудность отражает ограниченность классических представлений в

попытке описать истинную природу квантового мира. Но математические расчёты, проведённые на основе квантовой теории, а также десятилетия экспериментов убеждают нас, что эти особенности квантового спина вне всяких сомнений.

Мы только что познакомились со спином вовсе не для того, чтобы погрузиться в мир хитросплетений физики частиц. Совсем наоборот: особенности спина предоставляют простую лабораторию для получения неожиданных ответов на вопросы о реальности. Поставим вопрос: обладает ли частица *на самом деле* одновременно определённым значением спина относительно любой оси, хотя мы никогда не сможем узнать это более чем для одной оси за раз в силу принципа квантовой неопределённости? Или же принцип неопределённости говорит нам нечто иное? Говорит ли он нам, вопреки классическим представлениям о реальности, что частица просто не имеет и не может иметь одновременно такие характеристики? Говорит ли он нам, что частица пребывает в состоянии квантовой неопределённости, не имея никакого определённого спина относительно любой выбранной оси, до тех пор, пока кто-нибудь или что-нибудь не измерит его, побудив частицу мгновенно отреагировать на это, приняв — с вероятностью, определяемой квантовой теорией, — то или иное значение (по часовой стрелке или против) относительно выбранной оси? Изучая этот вопрос (в сущности, тот же самый, что и об одновременном измерении положения и скорости частицы), мы тем самым можем использовать спин для исследования природы квантовой реальности (и для получения ответов на вопросы, которые значительно превосходят по важности частный пример спина). Давайте посмотрим, как это сделать.

Как было прямо показано физиком Дэвидом Бомом^{[\[50\]](#)}, рассуждение Эйнштейна, Подольского и Розена применимо и к вопросу о том, имеют ли частицы определённый спин относительно некоторых выбранных осей. И вот каким образом. Установим два детектора, измеряющих спин попадающих в них электронов: один — в левой части лаборатории, а второй — в правой. Устроим теперь так, чтобы два электрона испускались из одного источника, находящегося посередине между двумя детекторами, таким образом, чтобы их спины — а не их положения и скорости, как в нашем предыдущем примере — были взаимосвязаны. Детали того, как это можно устроить, несущественны; важно только, что это можно сделать и, в действительности, этого легко достичь. Взаимосвязь можно организовать таким образом, что когда детекторы настроены на измерение спина вдоль одной и той же оси, то они всегда будут давать одинаковые результаты: если, к примеру, детекторы настроены на измерение спина относительно

вертикальной оси и левый детектор показывает, что спин направлен по часовой стрелке, то и правый детектор покажет то же самое; если детекторы настроены на измерение спина вдоль оси, наклонённой на 60° по часовой стрелке от вертикали, и левый детектор показывает, что спин направлен против часовой стрелки, то и правый детектор покажет то же самое; и т. д. Опять же, в квантовой механике в лучшем случае мы можем предсказать лишь вероятность того, что детекторы зарегистрируют то или иное направление спина, но со 100%-й уверенностью мы можем утверждать, что показания обоих детекторов обязательно совпадут.^[29]

Бом рассуждал так же, как ЭПР по отношению к определению положения и скорости частиц. Корреляция между спинами частиц позволяет нам косвенно определять спин двигающейся влево частицы относительно некоторой оси путём измерения спина у летящей вправо частицы относительно той же оси. Поскольку измерение проводится в правой части лаборатории, далеко от летящей влево частицы, оно никоим образом не может повлиять на неё. Следовательно, левая частица должна иметь точно определённую величину спина; мы определили эту величину, пусть и косвенно. Более того, поскольку мы можем провести подобное измерение относительно *любой* оси, то же самое заключение также должно быть справедливым для *любой* оси: летящий влево электрон должен иметь определённую величину спина относительно *любой* оси, даже если мы в состоянии определить эту величину только относительно одной оси в одном измерении. Конечно, можно поменять роли левой и правой частиц, откуда следует вывод, что каждая частица имеет определённый спин относительно *любой* оси.^{51}

На данном этапе, не видя особой разницы с примером ЭПР, касающимся определения положения и скорости частиц, вы можете, как Паули, возразить, что нет смысла задаваться подобными вопросами. Если вы в действительности не можете измерить спин одновременно относительно нескольких осей, то к чему гадать, имеет ли частица определённый спин — по или против часовой стрелки — относительно каждой из них? Квантовая механика и физика в целом обязаны принимать в расчёт только те характеристики мира, которые могут быть измерены. И ни Бом, ни Эйнштейн, ни Подольский, ни Розен не утверждали, что измерения могут быть проведены. Они утверждали лишь то, что вопреки принципу неопределённости частицы всегда обладают определёнными характеристиками, даже если мы никогда не сможем узнать их точные значения. Такие характеристики называют *скрытыми характеристиками*

или, чаще, *скрытыми параметрами*.

И вот где Джон Белл сказал веское слово. Он понял, что хотя и невозможно одновременно определить спин частицы относительно более чем одной оси, но тем не менее, если частица в действительности *имеет* определённый спин относительно всех осей, то отсюда вытекает одно следствие, которое уже можно проверить экспериментально.

Тестирование реальности

Чтобы понять суть идеи Белла, вернёмся к Малдеру и Скалли и представим, что каждый из них получил другую посылку, также содержащую титановые коробочки, но с новой важной особенностью. Теперь каждая титановая коробочка имеет не одну, а три дверки: одну сверху, одну сбоку и одну спереди.^{[152](#)} Сопроводительное письмо извещает, что теперь при открытии любой из трёх дверок коробочки находящийся внутри неё шарик вспыхивает случайным образом либо синим, либо красным цветом. Если на той же коробочке открывается другая дверка (например, верхняя вместо боковой или передней), то шарик может случайным образом вспыхнуть другим цветом. Но когда уже открыта одна дверка и шарик вспыхнул каким-то цветом, то невозможно определить, какой был бы цвет шарика, если бы мы открыли другую дверку. (Это свойство соответствует квантовой неопределённости: точно измерив одну характеристику, вы ничего не можете сказать относительно других). Наконец, в письме говорится, что снова имеется таинственная связь, странное сцепление между двумя наборами титановых коробочек: несмотря на то что все шарики случайным образом выбирают свой цвет при открытии одной из трёх дверок своей коробочки, если Малдер и Скалли откроют *одинаковые* дверки коробочек с *одним и тем же* номером, то увидят шарики одинакового цвета. Например, если Малдер откроет верхнюю дверку на своей коробочке с номером 1 и увидит синий шарик, то Скалли также увидит синий шарик, открыв верхнюю дверку на своей коробочке с номером 1; если Малдер откроет боковую дверку на своей коробочке номер 2 и увидит красный цвет, то и Скалли увидит красный, открыв боковую дверку на своей коробочке номер 2, и т. д. И открыв несколько дюжин коробочек (предварительно договариваясь по телефону, какую дверку какой коробочки открывать в следующий раз), Скалли и Малдер убеждаются, что всё так и есть, как написано в письме.

Хотя Малдер и Скалли поставлены в несколько более сложную

ситуацию, чем раньше, но на первый взгляд кажется, что прежние аргументы Скалли подойдут и здесь.

«Малдер, — говорит Скалли, — это столь же глупо, как в прошлый раз. И здесь нет тайны. Шарики внутри каждой коробочки можно просто запрограммировать. Ты не находишь?»

«Но теперь тут три дверки, — возражает Малдер, — так что шарик не может “знать”, какую дверку мы откроем, верно?»

«А ему и не нужно гадать, — объясняет Скалли. — Всё это запрограммировано. Возьмём, к примеру, следующую неоткрытую коробочку под номером 37. Представь себе, что шарик в моей коробочке 37 запрограммирован, скажем, вспыхнуть красным цветом, если открыта верхняя дверка, синим цветом, если открыта боковая, и снова красным, если открыта передняя дверка. Я называю это программу *красный, синий, красный*. И тогда ясно, что тот, кто послал нам эту штуку, ввёл в твою коробочку 37 ту же самую программу, так что когда мы оба откроем одинаковые дверки, то увидим одинаковые цвета. Это объясняет “таинственную связь”: если наши коробочки с одинаковыми номерами запрограммированы одинаковым образом, то мы увидим одинаковые цвета, открыв одинаковые дверки. Нет здесь *никакой* тайны!»

Но Малдер не верит в то, что шарики запрограммированы. Он верит письму. Он верит, что шарики случайным образом выбирают между красным и синим цветом при открытии одной из дверей, так что между его коробочками и коробочками Скалли *действительно существует* некая таинственная дальнодействующая связь.

Кто же прав? Поскольку невозможно изучить шарики перед или во время предполагаемого случайного выбора цвета (помните, что любая такая попытка приведёт к тому, что шарик немедленно выберет себе цвет случайным образом), то кажется невозможным установить, кто прав — Малдер или Скалли.

Однако примечательно, что после небольшого раздумья Малдер понимает, что *можно провести* эксперимент, который определил бы, кто же прав. Рассуждения Малдера просты, но они всё же чуть глубже, чем раньше, затрагивают математику. Несомненно, стоит попытаться проследить детали — их не так уж и много, — но не беспокойтесь, если что-то ускользнёт от вас; мы вскоре кратко суммируем основные выводы.

Малдер понимает, что он и Скалли до сих пор рассматривали лишь то, что произойдёт, если они будут открывать одинаковые дверки в коробочках с одинаковыми номерами. Перезвонив Скалли, он взволнованно объясняет ей, что можно узнать кое-что важное, если они будут выбирать дверки

случайным образом и независимо друг от друга, а не открывать всегда одинаковые дверки.

«Малдер, пожалуйста, дай мне насладиться своим отпуском. Что мы можем узнать таким образом?»

«Скалли, мы сможем рассудить, кто из нас прав».

«Ладно, я слушаю».

«Всё очень просто, — продолжает Малдер. — Вот что я понял. Если ты права, то, открывая двери одинаковых коробок случайным образом и независимо друг от друга, мы обнаружим, что *более* чем в 50% случаев наши результаты (цвета шариков) совпадут. Разумеется, для набора статистики надо открыть достаточно много коробок. Но если мы обнаружим, что наши результаты не совпадают более чем в 50% случаев, тогда ты не можешь быть права».

«В самом деле, почему так?» — немного заинтересовалась Скалли.

«Вот пример, — продолжает Малдер. — Предположим, ты права, и каждый шарик действует в соответствии с программой. Пусть к примеру, какая-то коробочка запрограммирована так, что при открытии верхней, боковой и передней дверок появляются *синий, синий и красный* цвета соответственно. Далее, поскольку мы оба выбираем одну из трёх дверок, то всего имеется девять возможных комбинаций дверок, которые мы можем открыть в своих коробочках с одинаковым номером. Например, я могу выбрать верхнюю дверку на своей коробочке, тогда как ты можешь выбрать боковую на своей; или я могу выбрать переднюю дверку, а ты — верхнюю и т. д.»

«Да, конечно, — перебивает Скалли. — Если мы припишем верхней дверке номер 1, боковой — номер 2, а передней — 3, то получается ровно девять комбинаций выбора дверок: (1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (2, 2), (2, 3), (3, 1), (3, 2) и (3, 3)».

«Да, всё верно, — продолжает Малдер. — Теперь важный момент: пять из девяти комбинаций дверок — (1, 1), (2, 2), (3, 3), (1, 2) и (2, 1) — соответствуют тому, что открыв свои дверки, мы увидим один и тот же цвет. В первых трёх вариантах мы выбираем одинаковые дверки, а тогда, как мы знаем, мы *всегда* видим одинаковые цвета. В остальных двух случаях — (1, 2) и (2, 1) — мы тоже обнаруживаем одинаковые цвета, но уже в силу того, что шарики запрограммированы на один цвет (синий) при открытии дверок с номерами 1 и 2. Итого, поскольку 5 больше половины от 9, то более чем в половине случаев — более чем в 50% случаев — мы увидим один и тот же цвет».

«Но подожди, — протестует Скалли. — В твоём примере все

коробочки запрограммированы одинаково: *синий, синий, красный*. Я же предполагала, что коробочки с разными номерами могут быть запрограммированы по-разному».

«На самом деле это не имеет значения. Вывод справедлив для любых вариантов программ. Смотри, мои рассуждения с вариантом *синий, синий, красный* опирались только на тот факт, что два цвета в программе одинаковы, так что мой вывод справедлив для любого варианта программы с двумя одинаковыми цветами: *красный, красный, синий* или *красный, синий, красный* и т. д. В любом варианте будет как минимум два одинаковых цвета; иной исход будет лишь в случае, когда все три цвета одинаковы — *красный, красный, красный* или *синий, синий, синий*. Но в последнем случае мы всегда увидим одинаковый цвет, какие бы дверцы мы ни выбрали, так что процент совпадений только увеличится. Итак, если твоё объяснение верно и коробочки запрограммированы — пусть даже каждая пара коробочек с одинаковыми номерами запрограммирована по-своему — то мы должны увидеть одинаковые цвета *более* чем в 50% случаев».

Таковы аргументы. Трудная часть наших рассуждений позади. Суть в том, что *существует* тест, позволяющий установить, права ли Скалли и действует ли каждый шарик в соответствии с программой, которая однозначно определяет, какой вспыхнет свет в зависимости от того, какая дверка откроется. Скалли с Малдером осталось лишь провести сам эксперимент: случайным образом и независимо друг от друга открывать по одной из дверей в каждой паре коробочек с одинаковыми номерами и записывать цвет шариков. Затем им надо будет сравнить свои записи и установить, совпали ли их результаты *более* чем в 50% случаев.

В следующем разделе мы увидим, что «на языке шариков» Малдер предложил провести то же самое, что и Джон Белл на языке физики.

Подсчёт ангелов на игле

Полученный результат прямо переносится на физику. Представим, что у нас есть два детектора, один — в левой части лаборатории, а второй — в правой; эти детекторы измеряют спин попадающих в них скоррелированных частиц вроде электронов, как в эксперименте, обсуждавшемся в предпоследнем разделе. Перед измерением требуется выбрать ось (вертикальную, горизонтальную или любую другую), относительно которой будет определяться спин; ради простоты

предположим, что нам попался детектор, купленный по дешёвке на распродаже, который может измерять спин относительно только трёх осей. При каждом измерении мы будем определять направление спина электрона относительно выбранной оси: по или против часовой стрелки.

Согласно Эйнштейну, Подольскому и Розену, каждый электрон попадает в детектор уже как бы запрограммированным, так что он имеет определённое значение спина относительно каждой из трёх осей ещё до измерения, а само измерение только определяет этот спин. Например, электрон, вращающийся по часовой стрелке относительно каждой из трёх осей, имеет программу «*по, по, по*» относительно часовой стрелки; электрон, вращающийся по часовой стрелке относительно первых двух осей и против часовой стрелки относительно третьей, имеет программу «*по, по, против*» относительно часовой стрелки и т. д. Для того чтобы объяснить корреляцию между двигающимся влево электроном и двигающимся вправо электроном, Эйнштейн, Подольский и Розен просто говорят, что скоррелированные электроны имеют идентичные спины и поэтому доставляют к детекторам, которые измеряют спины, идентичные программы. Поэтому если для измерения спина выбраны одинаковые оси в левом и в правом детекторе, то детекторы дадут и одинаковые результаты.

Отметим, что наш эксперимент полностью воспроизводит ситуацию, с которой столкнулись Скалли и Малдер, но с простой заменой: вместо выбора дверки в титановой коробочке мы выбираем ось; вместо того чтобы видеть красный или синий цвет, мы регистрируем направление спина — по или против часовой стрелки. Далее, точно так же, как, открывая одинаковые дверки в титановых коробочках с одинаковыми номерами, мы видим одинаковый цвет, так и, выбирая одинаковые оси на обоих детекторах при измерении спина пары скоррелированных электронов, мы получаем одинаковый спин. Наконец, подобно тому как, открывая какую-либо дверцу титановой коробочки, мы лишаем себя возможности узнать, какой цвет мы бы увидели, если бы выбрали другую дверку, так и измерение спина относительно какой-либо оси лишает нас возможности узнать (в силу квантовой неопределённости), какой спин мы бы зарегистрировали, если бы выбрали другую ось.

И весь приведённый выше анализ Малдера для определения, кто прав в вопросе с шариками инопланетян, равным образом применим и к эксперименту с определением спина электронов. Если правы ЭПР, и каждый электрон действительно имеет определённый спин относительно всех трёх осей (если каждый электрон заранее «запрограммирован» на определённый результат при измерении спина относительно каждого из

направлений), тогда можно сделать следующее предсказание. Измерив спин достаточно большого количества пар идентичных электронов относительно случайно выбираемых осей, мы получим, что *более чем в половине случаев электроны имеют одинаковый спин*. Если это не так, то Эйнштейн, Подольский и Розен не правы.

В этом и состоит открытие Белла. Оно показывает, что хотя вы не можете измерить спин электрона одновременно относительно нескольких осей — вы не можете «прочитать» программу, которая доставляется к детектору, — это *не* означает, что попытка установить, имеет ли электрон определённый спин относительно более чем одной оси одновременно, равносильна подсчёту количества ангелов, которые могут уместиться на кончике иглы. Далеко не так. Белл нашёл проверяемое следствие, которое должно выполняться, если частицы имеют определённый спин относительно каждой оси. Используя оси под тремя разными углами, Белл нашёл способ подсчитать количество ангелов Паули.

Нет дыма без огня

На тот случай, если вы упустили какие-нибудь детали, суммируем, к чему мы пришли. Посредством принципа неопределённости Гейзенберга квантовая механика утверждает, что в мире есть характеристики — такие как положение и скорость частицы или спин частицы относительно различных осей, — которые не могут одновременно иметь определённые значения. *Согласно квантовой механике частица не может одновременно иметь определённое положение и определённую скорость; частица не может иметь определённый спин (по часовой стрелке или против часовой стрелки) относительно более чем одной оси одновременно; частица не может иметь одновременно определённые значения характеристик, которые находятся по разные стороны от черты, проведённой принципом неопределённости*. Частицы как бы подвешены в состоянии квантовой неопределённости, парят в размытой, аморфной, вероятностной смеси всех возможностей; и только в ходе измерения из множества возможностей выбирается один определённый вариант. Ясно, что эта картина реальности радикально отличается от той, которую рисовала классическая физика.

Эйнштейн, вечный скептик в отношении квантовой механики, вместе со своими коллегами, Подольским и Розеном, попытался использовать вероятностный аспект квантовой механики как оружие против самой этой теории. ЭПР утверждали, что даже если квантовая механика не позволяет

одновременно определить такие характеристики, частицы тем не менее в действительности имеют определённые значения положения и скорости; частицы в действительности имеют определённые значения спина относительно всех осей; частицы в действительности имеют определённые значения для всех комбинаций характеристик, запрещённых квантовой неопределённостью. ЭПР, таким образом, утверждали, что квантовая механика не может оперировать всеми элементами физической реальности — она не может управиться одновременно с положением и скоростью частицы; она не может управиться со спином частицы относительно более чем одной оси — и, следовательно, это неполная теория.

Долгое время казалось, что подтверждение или опровержение утверждения ЭПР — это дело скорее метафизики, чем физики. Как говорил Паули, если вы не можете в действительности измерить характеристики, запрещённые квантовой неопределённостью, то что из того, что, возможно, они существуют на некотором скрытом уровне реальности? Но, что замечательно, Джон Белл обнаружил нечто, что ускользнуло от Эйнштейна, Бора и других гигантов теоретической физики XX в.: он нашёл, что просто существование определённых вещей, даже если их невозможно явно измерить или определить, имеет следствия, которые можно проверить экспериментально. Белл показал, что если ЭПР правы, то результаты, полученные двумя далеко разнесёнными в пространстве детекторами, измеряющими определённые характеристики частиц (спин относительно различных случайно выбираемых осей в рассмотренной нами схеме), совпадут более чем в 50% случаев.

Белл понял это в 1964 г., но в то время ещё не было технологии, которая позволила бы провести требуемый эксперимент. Такая технология появилась в начале 1970-х гг. Сначала Стюартом Фридманом и Джоном Клаузером из Беркли, затем Эдвардом Фраем и Рэндаллом Томпсоном из Техасского агротехнического университета и, в завершение, в начале 1980-х гг. Аланом Аспектом с сотрудниками, работавшими во Франции, были проведены всё более тонкие и впечатляющие эксперименты. В эксперименте Аспекта два детектора были разнесены друг от друга на расстояние 13 м, а контейнер с возбуждёнными атомами кальция был размещён посередине между ними. Хорошо понятная физика показывает, что каждый атом кальция, возвращаясь в своё нормальное состояние с меньшей энергией, испускает пару фотонов, разлетающихся в противоположных направлениях с полностью скоррелированными величинами спинов, как в обсуждавшемся нами примере со скоррелированными спинами электронов. В самом деле, в эксперименте

Аспекта одинаково настроенные детекторы всегда регистрировали одинаковый спин каждой пары фотонов. Если бы к детекторам Аспекта были подсоединены световые индикаторы, мигающие красным светом при попадании в них фотонов со спинами, ориентированными против часовой стрелки, и синим светом — при попадании в них фотонов со спинами, ориентированными по часовой стрелки, то детекторы синхронно вспыхивали бы одинаковыми огоньками.

Но, — и это самое важное, — проведя множество экспериментов, в которых настройки детекторов менялись случайным и независимым друг от друга образом, Аспект обнаружил, что *показания детекторов не совпали более чем в 50% случаев*.

Это сногсшибательный результат. От такого результата перехватывает дыхание. Но если вы этого ещё не поняли, я кое-что поясню. Результат Аспекта показал, что утверждение Эйнштейна, Подольского и Розена опровергнуто экспериментом — не теорией, не размышлениями, а самой природой. И это значит, что что-то неправильное было в рассуждениях, использованных ЭПР при получении вывода о том, что частицы обладают определёнными значениями характеристик — вроде величины спина относительно разных осей, — для которых это запрещено принципом неопределённости.

Но где же они могли ошибиться? Вспомним, что рассуждение Эйнштейна, Подольского и Розена зиждилось на одном центральном предположении: если в данный момент времени можно определить характеристику объекта путём эксперимента, проведённого над другим, пространственно удалённым объектом, то первый объект должен был ещё до измерения иметь определённое значение этой характеристики. Основание для этого предположения было простым и вполне здравым. Вы проводите измерения здесь, тогда как первый объект удалён и находится *там*. Два объекта пространственно разделены, поэтому измерение не может как-либо повлиять на первый объект. Точнее, если, измеряя один объект, вы каким-то образом влияете на другой (например, вынуждаете другой объект принять то же значение спина относительно выбранной оси), то это должно произойти с задержкой как минимум на такое время, которое потребуется свету, чтобы преодолеть расстояние между двумя объектами, поскольку ничто не распространяется быстрее света. Но как в нашем абстрактном рассуждении, так и в реальном эксперименте две частицы исследуются *одновременно*. Поэтому всё, что мы можем узнать о первой частице, изучив вторую, она должна иметь совершенно независимо от того, проводим ли мы измерение второй частицы. Короче говоря, рассуждение

Эйнштейна, Подольского и Розена основывалось на том, что *данный объект никак не затрагивает то, что вы делаете с другим, отдалённым от него объектом.*

Но, как мы уже видели, эти рассуждения ведут к предсказанию, что показания детекторов должны совпасть более чем в половине случаев, что опровергается экспериментом. Поэтому нам остаётся лишь заключить, что предположение, сделанное Эйнштейном, Подольским и Розеном, не может соответствовать устройству нашей квантовой Вселенной, сколь бы правдоподобным оно ни выглядело. Таким образом, путём косвенной, но правильно выстроенной аргументации, эксперименты ведут нас к заключению, что *удалённый объект там может чувствовать, что вы делаете с другим объектом здесь.*

Хотя квантовая механика показывает, что частицы случайным образом выбирают те или иные величины во время измерения, мы поняли, что эти случайности могут быть связаны друг с другом через пространство. Пары должным образом подготовленных частиц — они называются *запутанными* частицами — выбирают свои характеристики не независимо друг от друга. Они уподобляются паре магических игральных костей, одна из которых бросается в Атлантик Сити, а другая — в Лас Вегасе; на каждой из игровых костей *случайным образом* выпадает то или иное число, но эти числа каким-то непостижимым образом оказываются равными. Запутанные частицы действуют аналогично, за исключением того, что им не нужна магия. *Запутанные частицы, даже когда они пространственно разделены, не действуют автономно.*

Эйнштейн, Подольский и Розен намеревались показать, что квантовая механика даёт неполное описание Вселенной. Полвека спустя теоретические догадки и экспериментальные результаты, вдохновлённые их работой, потребовали перевернуть их анализ с ног на голову и заключить, что неверна самая основная, интуитивно убедительная, классически осмысленная часть их рассуждения: Вселенная не является локальной. Результат того, что делается в одном месте, может быть связан с тем, что происходит в другом месте, даже если ничто не перемещается между этими местами — даже если ничто не может успеть преодолеть расстояние между ними. Интуитивно привлекательное предположение Эйнштейна, Подольского и Розена о том, что такие дальнедействующие корреляции возникают просто из-за того, что частицы имеют определённые, существующие до измерения, скоррелированные характеристики, исключается данными опыта. Вот что делает этот результат столь шокирующим.^{[153](#)}

В 1997 г. Николас Гизин со своей группой из Женевского университета провёл эксперимент по схеме Аспекта, удалив детекторы друг от друга на расстояние 11 км. Результат не изменился. С точки зрения микроскопических масштабов длин волн фотонов, 11 км составляют гигантскую величину. С тем же успехом расстояние могло быть равным 11 млн км или 11 млрд световых лет. Есть все основания полагать, что корреляции между фотонами будут сохраняться независимо от того, как далеко разнесены детекторы.

Это выглядит совершенно противостоественно. Но теперь есть неоспоримое доказательство этой так называемой *квантовой запутанности*. Если два фотона запутаны, то измерение спина любого фотона относительно одной оси «заставляет» другой, удалённый фотон принять тот же спин относительно той же оси; акт измерения одного фотона «вынуждает» другой, возможно, удалённый фотон вынырнуть из тумана вероятности и принять определённое значение спина — значение, которое в точности равно спину его удалённого напарника. И это поражает разум.^[30]

Запутанность и специальная теория относительности: стандартный подход

Я заключил в кавычки слова «заставляет» и «вынуждает», поскольку, хотя они и передают ощущение, соответствующее нашей классической интуиции, но их точный смысл в данном контексте критически важен с точки зрения возможности ещё более глубокого переворота в наших взглядах. В своём повседневном смысле эти слова вызывают образ волевой причинности: мы делаем что-то здесь, чтобы *заставить* или *вынудить* что-то конкретное произойти там. Если бы именно так и были связаны два фотона, то *это означало бы смертный приговор специальной теории относительности*. Эксперименты показывают, что с точки зрения экспериментатора, находящегося в лаборатории, в тот самый момент, когда измеряется спин одного фотона, второй фотон мгновенно обретает тот же спин. Если бы что-то передавалось от фотона к фотону, предупреждая второй фотон, что измерен спин первого фотона, то это «что-то» мгновенно бы преодолевало пространство между фотонами, что противоречило бы существованию предела скорости, установленному специальной теорией относительности.

Физики пришли к общему соглашению, что такое кажущееся

противоречие со специальной теорией относительности иллюзорно. На интуитивном уровне объяснение состоит в следующем. Хотя два фотона пространственно разделены, но между ними существует фундаментальная связь в силу их общего происхождения. Хотя фотоны удалились друг от друга и стали пространственно разделёнными, но их связывает общая история; даже на удалении друг от друга они составляют часть одной физической системы. Поэтому на самом деле это не акт измерения одного фотона вынуждает или заставляет другой удалённый фотон принимать идентичные характеристики. Скорее, фотоны столь тесно связаны, что можно и нужно считать их — хотя они пространственно разделены — частями одной физической сущности. Так что можно сказать, что акт измерения единой сущности — сущности из двух фотонов — воздействует на эту сущность, т. е. затрагивает оба фотона одновременно.

Хотя этот образ может сделать связь между фотонами более лёгкой для усвоения, но эта связь всё ещё остаётся смутной — что в действительности значит, что две пространственно разделённые вещи составляют одно целое? Более точно следующее представление. Когда специальная теория относительности говорит, что ничто не может двигаться быстрее света, это «ничто» относится к известной нам материи или энергии. Но наш случай более тонкий, поскольку не видно, чтобы какая-либо материя или энергия преодолевала расстояние между фотонами, так что нет ничего, чью скорость нам бы следовало оценить. Тем не менее есть способ проверить, не вступаем ли мы в противоречие со специальной теорией относительности. Общая черта, присущая как материи, так и энергии, состоит в том, что при своём переносе они передают информацию. Фотоны, путешествуя от радиостанции до вашего приёмника, переносят информацию. Электроны, достигающие вашего компьютера по каналам Интернета, также переносят информацию. Поэтому в любой ситуации, когда есть подозрение, что нечто — даже неопределённое нечто — перемещается со скоростью, превышающей скорость света, следует задаться вопросом, переносит ли это нечто информацию (или могло бы переносить). Если ответ на этот вопрос отрицательный, то проходит стандартное рассуждение, и скорость света не превышает, так что специальная теория относительности остаётся на своём месте. На практике именно этот вопрос часто используется физиками, чтобы определить, не нарушает ли некий тонкий процесс законы специальной теории относительности. (Но до сих пор ничто не нарушило.) Зададимся этим вопросом и здесь.

Можно ли каким-либо образом передать информацию от одного

фотона к другому, измерив спин одного из них относительно выбранной оси? Ответом будет «нет». Почему? Результатом измерения на каждом из двух детекторов будет лишь *случайная* последовательность значений спина, поскольку при измерении каждой пары частиц есть равная вероятность того, что спин окажется ориентированным по часовой стрелке или против неё. Мы никоим образом не можем повлиять на результат любого конкретного измерения или предсказать его. Таким образом, в списках измерений для каждого детектора нет никакого послания, нет никакого скрытого кода или какой-либо передачи информации. Интересно в этих списках лишь то, что они идентичны — но это невозможно установить, пока мы не сравнили списки, передав результаты измерений любым обычным способом со скоростью, меньшей скорости света (будь то по телефону, с помощью факса или электронного сообщения). Таким образом, хотя и кажется, что акт измерения спина одного из фотонов мгновенно влияет на другой, но никакой информации при этом от одного фотона к другому не передаётся, так что световой предел, установленный специальной теорией относительности, не превышает. Физики говорят, что спины фотонов скоррелированы — поскольку совпадают результаты измерений — но это не устанавливает традиционную причинно-следственную связь, поскольку ничто не передаётся между двумя удалёнными друг от друга точками.

Запутанность и специальная теория относительности: альтернативный подход

Так ли это? Полностью ли разрешён потенциальный конфликт между нелокальностью квантовой механики и специальной теорией относительности? Вероятно, да. На основе вышеприведённых доводов большинство физиков подводит итог, говоря, что результаты Аспекта по запутанным частицам находятся в состоянии мирного сосуществования со специальной теорией относительности. Короче говоря, специальная теория относительности каким-то чудом выживает. Многих физиков это удовлетворяет, но у других возникает беспокоящее ощущение, что в этой истории ещё не поставлена окончательная точка.

На инстинктивном уровне я всегда разделял точку зрения «мирного сосуществования», но нельзя отрицать, что проблема тонкая. В конце концов, не важно, какие общие слова произносятся по этому поводу, подчёркивается ли непереносимость информации, но факт остаётся

фактом: две далеко разнесённые в пространстве частицы, каждая из которых подчиняется вероятностным законам квантовой механики, каким-то образом остаются «на связи» друг с другом, так что одна мгновенно повторяет всё то, что делает другая. И это упорно наводит на мысль, что *нечто* быстрее света действует между ними.

К чему же мы приходим? Нет «железного», общепринятого ответа. Некоторые физики и философы считают, что наше внимание направлено немного не туда: суть теории относительности, как они верно отмечают, состоит не столько в том, что свет устанавливает предельный порог скорости, как в том, что скорость света одинакова для всех наблюдателей, независимо от скорости их относительного движения.^[54] Эти исследователи подчёркивают, что главный принцип специальной теории относительности состоит в том, что ни одна точка отсчёта ничем не выделяется по сравнению со всеми остальными. Таким образом, они полагают (и многие с этим согласны), что если равноправное положение всех наблюдателей,двигающихся друг относительно друга с постоянной скоростью, удастся согласовать с экспериментальными данными, касающимися запутанных частиц, то напряжение, связанное со специальной теорией относительности, будет снято.^[55] Но этого не так-то легко достичь. Чтобы понять, с какими проблемами приходится сталкиваться, давайте посмотрим, как объясняется результат Аспекта в старых добрых учебниках по квантовой механике.

Согласно стандартной квантовой механике, проводя измерение и обнаруживая частицу в каком-то месте, мы тем самым вынуждаем волну вероятности измениться: весь диапазон возможных исходов сводится к одному конкретному результату, полученному в ходе измерения, как проиллюстрировано на рис. 4.7. Физики говорят, что акт измерения заставляет *коллапсировать* волну вероятности, и они предсказывают, что чем больше волна вероятности в какой-то выбранной точке, тем больше шансов, что волна сколлапсирует к этой точке, т. е. с тем большей вероятностью частица будет обнаружена именно в этой точке. В стандартной трактовке коллапс происходит мгновенно во всей Вселенной: как только вы где-то обнаружили частицу, так вероятность её обнаружения *в любом другом месте* сразу же падает до нуля, и это отражается в немедленном коллапсе волны вероятности.

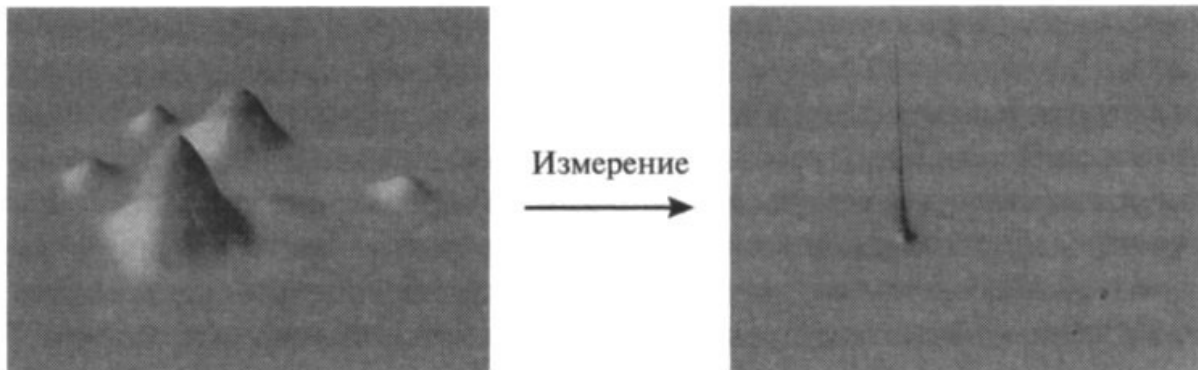


Рис. 4.7. Когда частица обнаруживается в каком-то месте, вероятность её обнаружения в любом другом месте падает до нуля, увеличиваясь до 100% в месте обнаружения

Когда в эксперименте Аспекта устанавливается, что спин одного фотона (летящего влево), направлен, скажем, по часовой стрелке относительно некоторой оси, то это вызывает коллапс волны вероятности во всём пространстве, мгновенно устанавливая вероятность обнаружения направления спина против часовой стрелки в нуль. Поскольку этот коллапс происходит везде, то он происходит и в месте нахождения второго фотона (связанного с первым и летящего вправо). Таким образом, сколь бы далеко от первого фотона ни находился второй, его волна вероятности мгновенно затрагивается изменением волны вероятности первого фотона, что даёт возможность второму фотону мгновенно принять тот же спин относительно выбранной оси. Значит, в стандартной трактовке квантовой механики именно это мгновенное изменение волны вероятности ответственно за влияние, происходящее со скоростью, превышающей скорость света.

Математический аппарат квантовой механики позволяет перевести на точный язык цифр это качественное описание. Можно подсчитать (детали можно найти в примечании [\[56\]](#)), как часто будут совпадать показания левого и правого детекторов в эксперименте Аспекта (когда оси, относительно которых проводится измерение, выбираются случайным образом и независимо друг от друга), если принять механизм дальнего действия, возникающий из-за коллапса волн вероятности. Тогда оказывается, что показания детекторов должны совпасть *точно* в 50% случаев (а не более чем в 50% случаев согласно гипотезе о *локальной* Вселенной, использованной в работе Эйнштейна–Подольского–Розена). С впечатляющей точностью как раз это обнаружил Аспект в своих

экспериментах — именно 50%-е совпадение. Стандартная квантовая механика прекрасно согласуется с опытными данными.

Это впечатляющий успех. Тем не менее есть одна загвоздка. За более чем семьдесят лет никто так и не понял, как происходит коллапс волны вероятности и происходит ли он вообще. За всё это время предположение о коллапсе волны вероятности подтверждалось убедительной связью между вероятностными предсказаниями квантовой теории и конкретными экспериментальными данными. Но это предположение начинено загадками. Одна из них состоит в том, что коллапс не следует из математического аппарата квантовой механики; он должен вводиться вручную, и нет признаваемого всеми или оправданного экспериментально пути, как это сделать. Другая загадка: как так получается, что в результате обнаружения электрона детектором в Нью-Йорке волна вероятности мгновенно падает до нуля в галактике Андромеды? Конечно, обнаружив частицу в Нью-Йорке, вы уже не можете обнаружить её в иной галактике, но какой неизведанный механизм обеспечивает такую невиданную оперативность? Как, говоря попросту, часть волны вероятности в галактике Андромеды или где бы там ни было мгновенно «узнаёт», что ей надо мгновенно упасть до нуля?^[57]

В главе 7 мы поднимем эту проблему измерения в квантовой механике (и увидим, что есть предложения, позволяющие вообще избавиться от представления о коллапсе волн вероятности), но пока нам достаточно отметить, что, как говорилось в главе 3, события, одновременные в одной системе отсчёта, не одновременны в другой системе отсчёта, двигающейся относительно первой. (Вспомните Щекотку и Царапку, синхронизирующих часы в движущемся поезде.) Так что если согласно одному наблюдателю волна вероятности претерпевает коллапс во всём пространстве одновременно, она *не* одновременно сколлапсирует во всём пространстве с точки зрения другого наблюдателя, двигающегося относительно первого. В действительности, в зависимости от направления движения, одни наблюдатели скажут, что первым был измерен левый фотон, тогда как другие отметят, что правый фотон был измерен первым, и никто из этих наблюдателей не может быть признан неправым. Следовательно, если бы представление о коллапсе волн вероятности было бы верным, то невозможно было бы установить, какое измерение — правого или левого фотона — повлияло на другое. Таким образом, из всех двигающихся с постоянной скоростью систем отсчёта коллапс волн вероятности выбирает одну особую систему отсчёта — ту, относительно которой коллапс происходит одновременно во всём пространстве, и измерения левым и

правым детектором происходят в один момент времени. Но выбор одной особой системы отсчёта порождает значительные проблемы с принципом равноправности всех систем отсчёта в специальной теории относительности. Чтобы обойти эту проблему, выдвигались различные предложения, но до сих пор неясно, решает ли какое-нибудь из них эту проблему.^[58]

Итак, хотя с точки зрения большинства учёных квантовая механика, запутанные частицы и специальная теория относительности гармонично сосуществуют друг с другом, но некоторые физики и философы считают, что вопрос их взаимосвязи всё ещё открыт. Вполне возможно, что взгляд большинства в конце концов одержит верх в некоторой более определённой форме. Но история показывает, что тонкие фундаментальные проблемы иногда сеют семена будущих революций. И только время покажет, будет ли так в данном случае.

Что нам со всем этим делать?

Рассуждения Белла и эксперименты Аспекта показывают, что такая Вселенная, какой представлял её Эйнштейн, может существовать в воображении, но не в реальности. Во Вселенной Эйнштейна всё, что бы вы ни делали прямо здесь, имело непосредственное отношение только к тому, что тоже находится здесь. С его точки зрения физика была чисто локальной. Но теперь мы видим, что эксперимент исключает такое представление.

Во Вселенной Эйнштейна все объекты также обладали определёнными значениями всех физических характеристик. Характеристики не пребывали в состоянии неопределённости, ожидая того момента, когда экспериментальные измерения вызовут их к существованию. Большинство физиков скажет, что Эйнштейн ошибался и в этом. С точки зрения большинства учёных характеристики частиц принимают определённые значения, когда акт измерения вынуждает их к этому — это представление мы ещё обсудим далее в главе 7. Когда частицы не наблюдаются и не взаимодействуют с окружающими объектами, их характеристики имеют неопределённое, размытое существование, характеризующееся только вероятностью обнаружения того или иного значения. Самые радикальные из тех, кто придерживается такого взгляда, заявят, что на самом деле, когда никто и ничто не «смотрит» на Луну и не взаимодействует с ней никоим образом, то *её нет на месте*.

Этот вопрос всё ещё открыт. Эйнштейн, Подольский и Розен рассудили, что единственно здравое объяснение того, почему далеко разнесённые в пространстве частицы могут обладать идентичными характеристиками, состоит в том, что частицы всегда имеют определённые характеристики (и благодаря общему прошлому их характеристики скоррелированы). Десятилетия спустя анализ Белла и данные Аспекта доказали, что их интуитивно напрашивающееся предположение, основанное на том, что частицы всегда имеют определённые характеристики, не может объяснить экспериментально наблюдаемые нелокальные корреляции. Но неспособность их концепции объяснить загадки нелокальности не означает, что исключается само представление о том, что частицы всегда имеют определённые характеристики. Данные исключают только локальную Вселенную, но не запрещают частицам иметь скрытые свойства (скрытые параметры).

Фактически, в 50-х гг. прошлого века Бом создал свою версию квантовой механики, которая включала в себя как нелокальность, так и скрытые параметры. В его подходе частицы всегда имеют и определённое положение, и определённую скорость, хотя мы не можем измерить обе эти характеристики одновременно. Квантовая механика в версии Бома даёт те же предсказания, что и обычная квантовая механика, но в его версии вводится даже ещё более странный элемент нелокальности, заключающийся в том, что на частицу, находящуюся в одном месте, действуют *силы*, мгновенно зависящие от условий в удалённых местах. Версия Бома показывает, как можно идти к цели Эйнштейна, восстанавливая некоторые из интуитивно привлекательных свойств классической физики (частицы имеют определённые характеристики), отброшенных квантовой революцией, но она также показывает, что достижение этого даётся ценой принятия ещё более вопиющей нелокальности. За такую цену Эйнштейн вряд ли утешился бы таким решением.

Необходимость отказа от локальности является самым поразительным уроком из работ Эйнштейна, Подольского, Розена, Бома, Белла и Аспекта, как и из работ многих других учёных, внёсших ощутимый вклад в рассматриваемую проблему. Благодаря своему прошлому объекты, находящиеся сейчас в отдалённых друг от друга частях Вселенной, могут быть частью единого целого, запутанного по законам квантовой механики. Даже будучи далеко удалёнными друг от друга, такие объекты обязаны вести себя пусть и случайным, но скоординированным образом.

Мы привыкли думать, что основное свойство пространства состоит в

том, что оно разделяет и разграничивает объекты. Но теперь мы видим, что квантовая механика радикально меняет этот взгляд. *Два объекта могут быть разделены гигантским расстоянием и всё же не иметь полностью независимого существования.* Квантовая связь может объединять их, делая характеристики одного из них обусловленными характеристиками другого. Пространство не разделяет такие запутанные объекты. Пространство не помогает преодолеть эту взаимную связь. Пространство, даже гигантский объём пространства, не может ослабить их квантово-механическую взаимную зависимость.

Некоторые люди интерпретируют это как «всё связано со всем» или «квантовая механика связывает всех нас в единое целое». Они рассуждают так: в конце концов, в момент Большого взрыва всё возникло из одного места, поскольку, как мы полагаем, всё, что мы сейчас считаем разными местами, изначально было одним местом. И поскольку, подобно двум фотонам, испускаемым одним атомом кальция, всё возникло из единого «нечто» в самом начале, то всё должно быть переплетено друг с другом квантово-механическим образом.

Хотя мне нравится это описание, но здесь есть некоторый перебор. Квантовые связи между двумя фотонами, испускаемыми одним ядром кальция, несомненно существуют, но они очень тонкие. В экспериментах Аспекта и им подобных очень важно, чтобы фотоны совершенно беспрепятственно долетали от своего источника к детекторам. Если бы они сталкивались со случайными частицами или ударялись об элементы экспериментальной установки до своего попадания в один из детекторов, [\[31\]](#) то их квантовую связь установить было бы невообразимо трудно. Вместо того чтобы следить за корреляциями двух фотонов, потребовалось бы отслеживать целый комплекс корреляций, включающий фотоны и всё, с чем они могли бы столкнуться. В результате всех таких столкновений и соударений квантовое запутывание расплылось бы до такой степени, что его стало бы практически невозможно обнаружить. Начальное сцепление фотонов фактически было бы стёрто.

Тем не менее поистине поразительно, что такие связи действительно существуют, и их можно прямо обнаружить на значительных расстояниях в тщательно подготовленных лабораторных условиях. Существование этих связей показывает нам, что пространство не есть то, что мы о нём думали раньше.

Часть II. Время и опыт

Глава 5. Замёрзшая река

Течёт ли время

Время находится среди самых знакомых и всё же наименее понятных явлений, с которыми человечество когда-либо сталкивалось. Мы говорим, что оно летит, мы говорим, что время — деньги, мы пытаемся экономить его и огорчаемся, когда тратим его впустую. Но *что* такое время? Перефразируя Св. Августина и судью Поттера Стюарта^[32], «мы знаем это, когда видим это», но, разумеется, на заре третьего тысячелетия наше понимание времени должно быть более глубоким. В некотором смысле, такое понимание есть. В другом — нет. В течение многих столетий замешательства и размышлений мы достигли понимания некоторых тайн времени, но многие из них остаются загадкой. Откуда происходит время? Какой бы могла быть Вселенная без времени? Может ли быть более одной размерности времени так же, как есть более одной размерности пространства? Можем ли мы «путешествовать» в прошлое? А если бы могли, то смогли бы изменить развитие последующих событий? Существует ли абсолютная, наименьшая величина времени? Время — это действительно фундаментальный ингредиент космоса или просто удобная конструкция для систематизации нашего восприятия, которая не обнаруживается в языке, на котором записано большинство фундаментальных законов Вселенной? Может ли время быть производным понятием, вытекающим из некоторой более фундаментальной концепции, которую ещё только предстоит открыть?

Поиск полных и абсолютно убедительных ответов на эти вопросы находится среди самых честлюбивых целей современной науки. Всё же глобальные вопросы отнюдь не единственные. Даже ежедневное ощущение времени приводит к некоторым труднейшим загадкам.

Специальная и общая теории относительности разрушили универсальность и цельность времени. Эти теории показали, что каждый из нас подбирает осколок старого единого времени Ньютона и несёт его с собой. Он становится нашими персональными часами, нашим персональным проводником, непреклонно подталкивающим нас от одного момента к следующему. Мы потрясены теориями относительности, мы поражаемся Вселенной, в которой наши индивидуальные часы, тикающие равномерно в соответствии с нашим интуитивным ощущением времени, при сравнении с другими часами обнаруживают различия. Время для вас не

обязательно должно быть тем же, что и для меня.

Давайте воспринимать этот урок как данность. Но какова истинная природа времени для меня? Что представляет собой полная характеристика времени, как явления, переживаемого и ощущаемого индивидуумом, без упора на сравнение с переживаниями других? Отражают ли эти переживания истинную природу времени? И что они говорят нам о природе реальности?

Наши ощущения учат нас, что прошлое отличается от будущего. Кажется, что будущее предоставляет изобилие возможностей, в то время как прошлое привязано к событию, которое фактически уже произошло. Мы считаем, что можем в той или иной степени влиять на будущее, воздействовать и формировать его, а прошлое кажется неизменным. И между прошлым и будущим находится скользкое понятие настоящего — скоротечная точка, постоянно пересоздающая саму себя, подобно кадрам кинофильма, когда они проносятся через яркий луч проектора и становятся на мгновение видимыми. Кажется, что время подчинено бесконечному, абсолютно постоянному ритму, достигая мимолётного пункта назначения в *сейчас* с каждым ударом барабанной палочки.

Наши ощущения также учат нас, что имеется очевидная асимметрия того, как события разворачиваются во времени. Бесполезно оплакивать пролитое молоко, потому что, будучи пролитым, оно никогда не сможет стать «непролитым»: мы ни разу не видели, чтобы разлитое молоко вдруг собралось, поднялось с пола и оказалось в стакане, который стоит на кухонном столе. Кажется, что наш мир твёрдо придерживается однонаправленной временной стрелы, никогда не отклоняясь от фиксированного условия, что события могут начинаться *так*, а заканчиваться *эдак*, но они никогда не смогут начаться *эдак*, а закончиться *так*.

Наши ощущения дают нам понятие о двух неотъемлемых свойствах времени. Первое — *кажется, что время течёт*. Как будто мы стоим на берегу реки времени, которая проносится мощным потоком, приближая будущее, которое становится *настоящим*, когда достигает нас, и стремительно проносится вниз по течению в прошлое. Или, если это представление выглядит слишком пассивным на ваш вкус, переверните метафору: мы плывём по реке времени, в то время как она неуклонно стремится вперёд, увлекая нас от одного настоящего момента к следующему, прошлое отступает с проходящим пейзажем, а будущее всегда ждёт нас ниже по течению. (Наши опыт также учит нас, что время может инспирировать самые расплывчатые метафоры.) Второе — *кажется, что*

время имеет направление. Кажется, что поток времени идёт по одному и только одному пути, в том смысле, что всё происходит в одной и только одной временной последовательности. Если кто-то дал вам коробку, содержащую короткометражный фильм о проливаемом стакане молока, и при этом плёнка разрезана на отдельные кадры, вы сможете, изучая набор изображений, собрать кадры в правильном порядке без всякой помощи или инструкций от создателя кинофильма. Время, кажется, имеет внутреннее направление, указывающее из того, что мы называем прошлым, в то, что мы называем будущим, и сущности имеют свойство изменяться — молоко проливается, яйца разбиваются, свечи сгорают, люди стареют — в соответствии с этим направлением.

Эти легко ощущаемые свойства времени порождают некоторые из его наиболее волнующих загадок. Течёт ли время на самом деле? Если да, тогда что именно течёт? И насколько быстро течёт это вещество времени? Действительно ли время имеет направление? Пространство, например, не имеет свойственного ему направления — для астронавта в тёмных глубинах космоса понятия влево и вправо, назад и вперёд, вверх и вниз ничем не выделены — так откуда же возникает стрела времени? Если существует стрела времени, является ли она абсолютной? Или существуют вещи, которые могут эволюционировать в направлении, противоположном тому, в которое указывает, как кажется, стрела времени?

Для начала подойдём к этим вопросам с позиций классической физики. Итак, в оставшейся части этой и в следующей главе (в которых, соответственно, обсудим течение времени и стрелу времени) мы будем игнорировать квантовую вероятность и квантовую неопределённость. Однако многое из того, что мы узнаем, непосредственно переносится в квантовую область, и в главе 7 мы обсудим квантовую точку зрения.

Течёт ли время?

С точки зрения разумного существа, ответ очевиден. Когда я печатаю эти слова, я ясно *чувствую* течение времени. Каждый удар по клавише открывает путь для следующего. Читая эти слова, вы, несомненно, тоже чувствуете течение времени, пока ваши глаза скользят по странице от слова к слову. Однако, несмотря на старание физиков, в законах физики ещё никто не нашёл убедительных свидетельств, подтверждающих это интуитивное ощущение течения времени. На самом деле, переосмысление некоторых выводов Эйнштейна из специальной теории относительности

показывает, что время не течёт.

Чтобы понять это, вернёмся к описанию пространства-времени в виде буханки хлеба (в виде блока), представленному в главе 3. Вспомним, что ломтики, формирующие блок, являются моментами настоящего для данного наблюдателя; каждый ломтик представляет пространство в один момент времени с его точки зрения. Объединение, получаемое путём расположения ломтиков один за другим в том порядке, в котором наблюдатель переживает эти ломтики (временные слои), заполняет область пространства-времени. Если мы расширим этот взгляд до логического предела и представим, что каждый слой отображает *всё* пространство в данный момент времени в соответствии с точкой зрения одного наблюдателя, и если мы добавим любой возможный слой от древнего прошлого до отдалённого будущего, блок будет охватывать всю Вселенную на протяжении всего времени — пространство-время в целом. Каждое событие, независимо от того, где или когда оно произошло, представлено некоторой точкой в блоке.

Это схематически проиллюстрировано на рис. 5.1, но открывающаяся перспектива должна заставить вас почесать голову. «Внешний» ракурс рисунка, на котором мы видим целую Вселенную, всё пространство в каждый момент времени — это фиктивная точка наблюдения, которая никогда не будет дана никому.

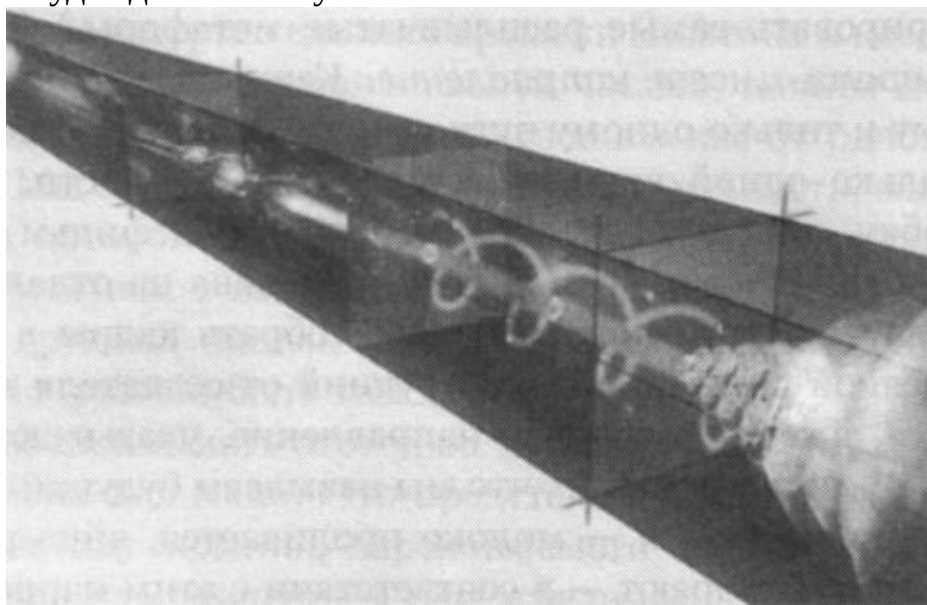


Рис. 5.1. Схематическое изображение всего пространства в течение всего времени (представлена, разумеется, только часть пространства в течение части времени) отображает

формирование некоторых первичных галактик, формирование Солнца и Земли, а также окончательную гибель Земли, когда Солнце раздуется до красного гиганта, как нам в настоящее время представляется наше отдалённое будущее

Мы все находимся *внутри* пространства-времени. Каждое событие, ощущаемое нами, всегда происходит в некотором месте пространства в некоторый момент времени. И поскольку рис. 5.1 должен описывать всё пространство-время, он включает в себя всю совокупность таких событий — ваших, моих, а также всех прочих. Если бы вы могли увеличить масштаб и вплотную рассмотреть всё приходящее на планете Земля, вы смогли бы увидеть Александра Великого на уроке у Аристотеля, Леонардо да Винчи, наносящего последние штрихи на портрет Моны Лизы, и Джорджа Вашингтона, пересекающего Делавер; если бы вы продолжили просматривать изображение слева направо, вы смогли бы увидеть вашу бабушку, играющую ещё маленькой девочкой, вашего отца, отмечающего своё десятилетие, и ваш собственный первый день в школе. Глядя ещё дальше направо в изображение, вы смогли бы увидеть самого себя, читающего эту книгу, рождение вашей праправнучки, а немного дальше её инаугурацию в качестве президента. Из-за плохого разрешения рис. 5.1 вы не можете в действительности видеть эти моменты, но вы можете видеть (схематическую) историю Солнца и планеты Земля от их рождения из сгущающегося газового облака до гибели Земли, когда Солнце разбухнет до красного гиганта. Всё это там есть.

Бесспорно, рис. 5.1 — это воображаемая перспектива, вне времени и пространства. Это вид, открывающийся из ниоткуда и из никогда. Хотя это и так — хотя мы не можем на самом деле шагнуть за пределы пространства-времени и полностью окинуть взглядом Вселенную, — схематическое изображение рис. 5.1 даёт мощный способ анализа и прояснения основных свойств пространства и времени. В качестве начального примера интуитивное ощущение течения времени может быть живо описано, по аналогии с кинопроектором. Мы можем вообразить свет, освещающий один временной слой за другим, оживляя на мгновение слой в настоящем, — делая сам слой на мгновение *настоящим*, — только чтобы тотчас отпустить его снова в темноту, когда свет перейдёт к следующему слою. Уже сейчас в рамках этого интуитивного способа размышлений о времени видно, что свет освещает слой, в котором вы, находясь на планете Земля, читаете *это* слово, а теперь он освещает слой, в котором вы читаете уже *это* слово. Но, с другой стороны, в то время как этот образ

соответствует ощущениям, учёные не в состоянии найти в законах физики что-либо, что воплощает такое перемещающееся световое пятно. Они не обнаружили физический механизм, который выделяет момент за моментом, делая его на мгновение реальным, — превращая момент в *настоящее*, — как механизм, всегда продвигающийся вперёд к будущему.

Совсем наоборот. Наряду с тем, что *изображение* на рис. 5.1, безусловно, воображаемо, имеется убедительное доказательство того, что блок пространства-времени — цельное пространство-время, а не последовательность временных слоёв — реален. То, что теория относительности рассматривает все моменты времени как равноправные, является не слишком популярным следствием трудов Эйнштейна. Хотя понятие *настоящего* играет центральную роль в нашем мировоззрении, теория относительности ещё раз ниспровергает нашу интуицию и объявляет, что каждый момент времени столь же реален, как и любой другой. Мы встретили эту идею в главе 3, когда размышляли о вращающемся ведре с точки зрения специальной теории относительности. Там же с помощью косвенных аргументов, аналогичных ньютоновским, мы пришли к заключению, что пространство-время является как минимум достаточным субстратом для обеспечения системы отсчёта с целью определения ускоренного движения. Здесь мы обсуждаем проблему с другой точки зрения и двигаемся дальше. Мы утверждаем, что каждая часть блока пространства-времени на рис. 5.1 существует столь же реально, как и любая другая, указывая, как полагал Эйнштейн, что реальность *в равной степени* включает в себя прошлое, настоящее и будущее, и что воображаемое нами течение, выносящее один слой пространства-времени к свету, тогда как другие уходят в темноту, является иллюзорным.

Устойчивая иллюзия прошлого, настоящего и будущего

Чтобы понять точку зрения Эйнштейна, нам необходимо работающее определение реальности, алгоритм для определения, что существует в данный момент. Вот один общий подход. Когда я воображаю реальность, которая существует в этот момент, я рисую перед своим мысленным взором своего рода снимок, мысленное статическое изображение единой Вселенной на данный момент времени. Когда я печатаю эти слова, моё ощущение того, что существует прямо сейчас, моё ощущение реальности сводится к списку всех явлений: мои кухонные часы отбивают полночь; мой кот, растянувшийся в прыжке от пола к подоконнику; первый луч

утреннего солнца, осветивший Дублин; шум в торговом зале Токийской фондовой биржи; слияние двух отдельных атомов водорода в Солнце; испускание фотона из туманности Ориона; последний момент жизни умирающей звезды, перед тем как она превратится в чёрную дыру, — которые имеются в данный момент в моём статическом мысленном изображении. Все эти события происходят прямо *сейчас*, поэтому я считаю их существующими прямо *сейчас*. Существует ли прямо сейчас Карл Великий? Нет. Существует ли прямо сейчас Нерон? Нет. Существует ли прямо сейчас Линкольн? Нет. Существует ли прямо сейчас Элвис? Нет. Никого из них нет в моём текущем списке настоящего. Существует ли прямо сейчас кто-нибудь, родившийся в 2300, или 3500, или 57000 г.? Нет. Опять-таки, никого из них нет в моём статическом мысленном изображении, никого из них нет в моём текущем временном слое, так что никого из них нет в моём текущем списке настоящего. Следовательно, я говорю без сомнений, что они в настоящее время не существуют. Таким способом я определяю реальность в любой заданный момент; это интуитивный подход, которым пользуются большинство из нас, часто неосознанно, размышляя о бытии.

Я воспользуюсь этой концепцией ниже, но имейте в виду один хитрый момент. Список настоящего — реальность при таком ходе мыслей — это забавнейшая вещь. Ничто из того, что вы видите прямо *сейчас*, не соответствует вашему списку настоящего, поскольку свету необходимо время, чтобы достичь ваших глаз. Всё, что вы видите прямо *сейчас*, уже произошло. Вы не видите слов на этой странице такими, какими они есть прямо сейчас; вместо этого, если вы держите книгу в тридцати сантиметрах от вашего лица, вы видите их такими, какими они были миллиардную долю секунды назад. Если вы осмотрите обыкновенную комнату, вы увидите вещи, какими они были от 10 до 20 миллиардных долей секунды назад. Если вы окинете взглядом Большой Каньон, вы увидите его противоположную сторону такой, какой она была примерно одну десятитысячную долю секунды назад. Если вы посмотрите на Луну, вы увидите её такой, какая она была полторы секунды назад. Солнце вы видите таким, каким оно было около восьми минут назад; звёзды, видимые невооружённым глазом, вы видите такими, какими они были, грубо говоря, от нескольких лет до 10 000 лет назад. Любопытно, что хотя мысленное замороженное изображение правильно представляет наше ощущение реальности, наше интуитивное ощущение «того, что находится там», состоит из событий, которые мы не можем почувствовать, на которые мы не можем повлиять или даже зафиксировать прямо сейчас. Вместо этого

настоящий список реальности может быть составлен только постфактум. Если вы знаете, как далеко находится что-либо, вы можете определить, когда был испущен свет, который вы видите *сейчас*, и на основании этого вы можете определить, с каким из ваших временных сечений он был связан, в какой из уже прошедших списков настоящего он должен быть вписан. Тем не менее, и это главное, если мы используем эту информацию для составления списка настоящего для любого данного момента времени, непрерывно дополняя его по мере получения световых сигналов от всё более далёких источников, всё перечисленное в списке и есть те вещи, которые, как мы интуитивно представляем, существуют в данный момент.

Удивительно, что этот, кажущийся простым, путь размышлений приводит к неожиданно сильной концепции реальности. В соответствии с ньютоновским абсолютным пространством и абсолютным временем, как мы видели, замороженное изображение Вселенной для каждого человека в данный момент времени содержит в точности одинаковые события; *сейчас* для каждого человека — это одно и то же *сейчас*, так что список настоящего для каждого человека в данный момент времени идентичен другим спискам. Если кто-то или что-то находится в вашем списке настоящего, значит, это обязательно есть и в моём списке настоящего для этого момента. Интуиция большинства людей всё ещё ограничивается этим образом мышления, но специальная теория относительности говорит совершенно иное. Посмотрите снова на рис. 3.4. Два наблюдателя в состоянии относительного движения имеют *сейчас*, которые отличаются: их *сейчас* режут пространство-время под разными углами. И разные *сейчас* означают разные списки настоящего. *Наблюдатели, движущиеся друг относительно друга, имеют разное представление о том, что существует в данный момент времени, и, следовательно, они имеют различные представления о реальности.*

При повседневных скоростях угол между временными слоями настоящего двух наблюдателей ничтожен; именно поэтому в повседневной жизни мы никогда не отмечаем расхождения между нашим определением настоящего и чьим-либо ещё. По этой причине большинство дискуссий по поводу специальной теории относительности сосредоточиваются на том, что произойдёт, если мы будем двигаться с гигантской скоростью (близкой к скорости света), поскольку такое движение будет значительно усиливать все эффекты. Но имеется другой путь усиления расхождения между концепциями *сейчас* двух наблюдателей, и я нахожу, что он чрезвычайно проясняет суть дела. Он основывается на следующем простом факте: если вы и я разрезаем обычную буханку под слегка различающимися углами, это

слабо повлияет на получившиеся куски хлеба. Но если буханка *огромна*, результат будет иным. Точно так же, как малейшее раскрытие лезвий чудовищно длинных ножниц приведёт к большому расстоянию между концами лезвий, разрезание огромной буханки хлеба под слегка отличающимися углами даёт сечения, которые расходятся на гигантскую величину на далёких расстояниях от места пересечения временных слоёв. Вы можете видеть это на рис. 5.2.

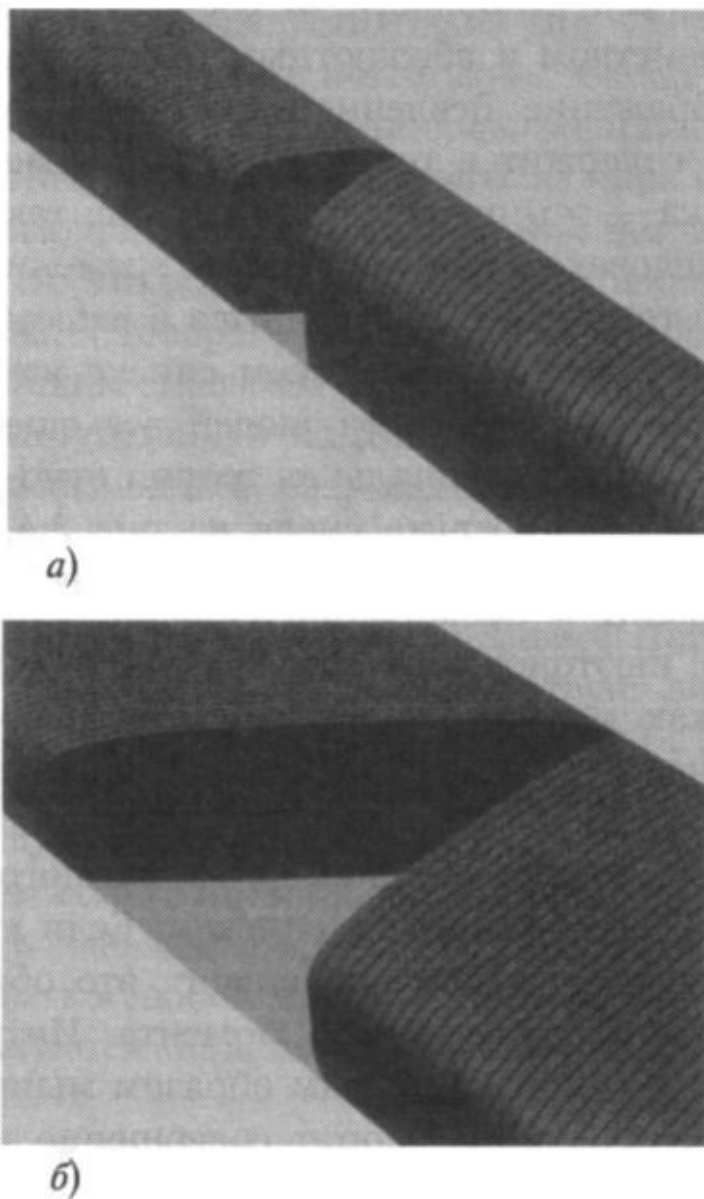
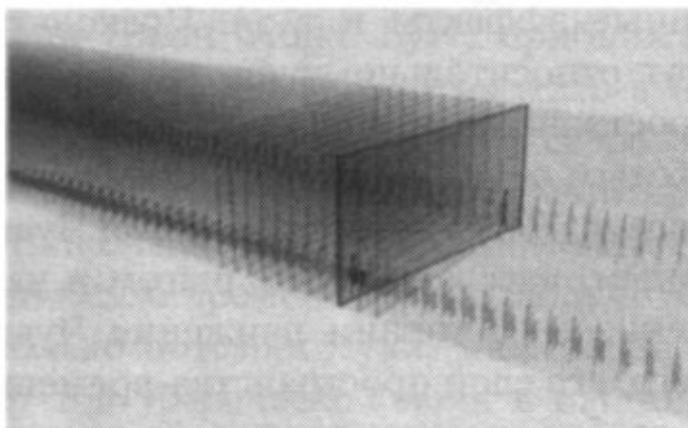


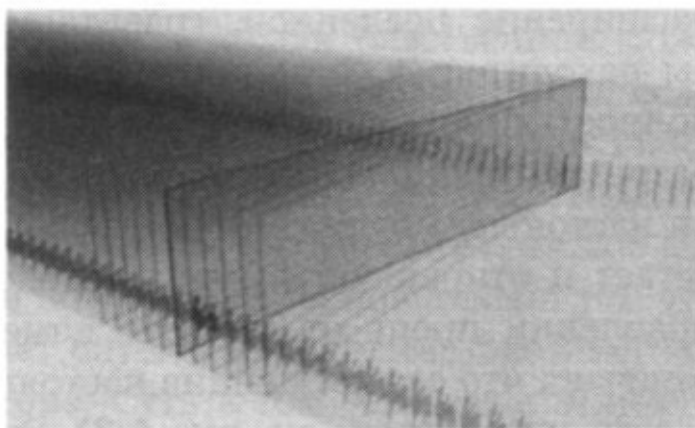
Рис. 5.2. (а) В обычной буханке ломтики разрезаны под слабо различающимися углами, и расходятся не сильно. (б) Но чем больше буханка, разрезаемая под тем же углом, тем

расхождение больше

То же самое справедливо для пространства-времени. При повседневных скоростях временные слои, изображающие настоящее для двух наблюдателей в относительном движении, будут ориентированы под слабо отличающимися углами. Если два наблюдателя находятся рядом, это вряд ли приведёт к заметному эффекту. Но, как и в буханке хлеба, крохотные углы приведут к большим различиям между слоями при их сравнении на больших расстояниях. Большое расхождение между слоями пространства-времени означает существенное расхождение в том, какие события каждый из наблюдателей рассматривает как происходящие сейчас. Это проиллюстрировано на рис. 5.3 и 5.4 и показывает, что индивидуумы,двигающиеся друг относительно друга даже с обычными, повседневными скоростями, будут иметь всё более различающиеся представления о настоящем, если они находятся на всё большем расстоянии друг от друга.

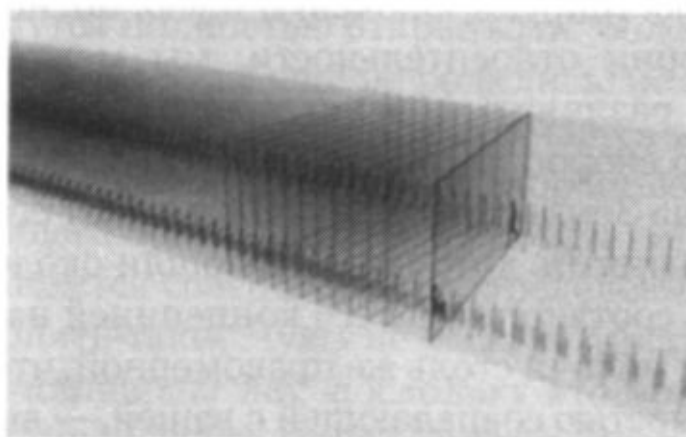


a)

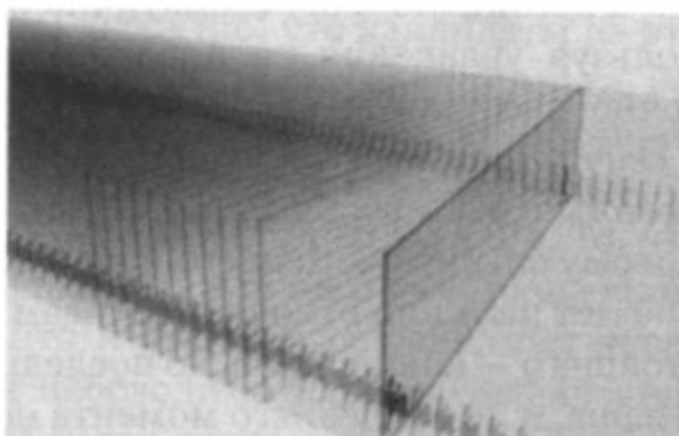


б)

Рис. 5.3. (а) Два наблюдателя в покое друг относительно друга имеют идентичное представление о *сейчас* и поэтому идентичные временные слои. Если один наблюдатель удаляется от другого, их временные слои — то, что каждый наблюдатель рассматривает в настоящий момент, — поворачиваются друг относительно друга; как показано, затемнённый слой настоящего для движущегося наблюдателя поворачивается в прошлое покоящегося наблюдателя. (б) Большее расстояние между наблюдателями даёт большее расхождение слоёв — большее расхождение в их концепциях *сейчас*



а)



б)

Рис. 5.4. (а) То же, что на рис. 5.3а за исключением того, что когда один наблюдатель движется в направлении второго, его слой *настоящего* поворачивается в будущее, а не в прошлое другого наблюдателя. (б) Аналогично рис. 5.3б — большее

разделение в пространстве даёт большее отклонение в представлениях о настоящем для одной и той же относительной скорости — но с поворотом, направленным в будущее вместо прошлого

Рассмотрим конкретный пример. Представим, что Чуви находится на планете в далёкой-далёкой галактике — 10 млрд световых лет от Земли — и праздно сидит в своей комнате. Далее представим, что вы (просто сидящий и читающий эти слова) и Чуви не двигаетесь друг относительно друга (для простоты проигнорируем движение планет, расширение Вселенной, гравитационные эффекты и т. д.). Поскольку вы находитесь в состоянии покоя друг относительно друга, вы и Чуви полностью согласны по вопросам пространства и времени: вы будете разрезать пространство-время одинаковым образом, так что ваши списки настоящего будут в точности совпадать. Через некоторое время Чуви встаёт и отправляется гулять спокойным, расслабленным шагом в направлении прочь от вас. Это изменение в состоянии движения Чуви означает, что его концепция настоящего, его слой пространства-времени слегка повернётся (см. рис. 5.3). Это слабое изменение угла не окажет заметного влияния рядом с Чуви: различие между его новым *сейчас* и вашим *сейчас* крайне мало. Но на гигантском расстоянии в 10 млрд световых лет этот ничтожный сдвиг в представлении Чуви о его *сейчас* усиливается (как в переходе от рис. 5.2 к рис. 5.3, но с главными героями, находящимися теперь на гигантском расстоянии друг от друга, которое существенно увеличивает сдвиг между их *сейчас*). *Настоящее Чуви и ваше настоящее, которые были одинаковыми, когда он ещё сидел в комнате, сильно разойдутся в результате его медленного движения.*

Рисунки 5.3 и 5.4 схематично иллюстрируют ключевую идею, но, используя уравнения специальной теории относительности, мы можем точно рассчитать, на сколько будут различаться ваши представления о *сейчас*.^[59] Если Чуви уходит от вас со скоростью около 18 км/ч (у Чуви довольно быстрая походка), события на Земле, которые принадлежат его новому списку настоящего, будут событиями, которые произошли около 150 лет назад по отношению к вам! В соответствии с его концепцией настоящего — концепцией, до последней мелочи столь же правомерной, что и ваша, и до последнего момента полностью совпадающей с вашей, — вы ещё даже не родились. Если он двигается по направлению к вам с той же скоростью, угловой сдвиг будет противоположным, как схематично показано на рис. 5.4, так что его *сейчас* будет совпадать с тем, что вы

считаете происходящим в будущем через 150 лет! Теперь в соответствии с его *сейчас* вы больше не можете быть частью этого мира. А если вместо прогулки Чуви прыгнет в звездолёт Миллениум Фалькон,двигающийся со скоростью 1800 км/ч (меньше, чем скорость Конкорда), его настоящее будет включать события на Земле, которые, с вашей точки зрения, имели место 15 000 лет назад или будут происходить через 15 000 лет в будущем, в зависимости от того, летит он от вас или к вам. Если задать подходящий выбор направления и скорости движения, то Элвис, Нерон, Карл Великий, Линкольн или кто-нибудь, родившийся на Земле в момент, который вы называете будущим, будут частью его списка настоящего.

Несмотря на необычность, ничто из этого не приводит к противоречиям или парадоксам, поскольку, как мы объяснили выше, чем дальше что-то находится, тем дольше придётся ждать, чтобы получить испущенный этим чем-то свет, и с помощью этого света определить, что входит, а что не входит в определённый список настоящего. К примеру, даже если Джон Уилкс Бут^[33], приближающийся к правительственной ложе в театре Форда, будет входить в новый список настоящего Чуви, если тот встанет и будет идти в сторону от Земли со скоростью около 17 км в час, ^{60} Чуви не сможет ничего предпринять, чтобы спасти президента Линкольна. На такой гигантской дистанции потребуется гигантское количество времени, чтобы получить и обменяться сообщениями, так что только потомки Чуви, миллиарды лет спустя, получат световой сигнал от той трагической ночи в Вашингтоне. Суть в том, что даже если его потомки используют эту информацию для внесения дополнений в громадную коллекцию прошлых списков настоящего, они обнаружат, что предательское убийство Линкольна входит в тот же список настоящего, который содержит подъём Чуви с кресла и его прогулку прочь от Земли. Они также обнаружат, что перед прогулкой список *сейчас* Чуви среди большого количества других вещей содержал и вас. Вы всё ещё находитесь на Земле XXI в. и читаете эти слова. ^{61}

Аналогичным образом возникают вопросы о нашем будущем, типа — «кто победит на президентских выборах США в 2100 г.?», которые кажутся полностью открытыми: более чем вероятно, что кандидаты на эти выборы даже ещё не родились, не говоря о том, чтобы начать делать карьеру. Но если Чуви поднимается из своего кресла и начинает движение в направлении Земли со скоростью около 11,5 км/ч, то его список настоящего *будет* включать выборы первого президента США XXII в. То, что кажется совершенно неопределённым для нас, для него уже произошло. Опять-

таки, Чуви не сможет узнать итоги выборов раньше, чем через миллиарды лет, поскольку это время необходимо нашему телевизионному сигналу, чтобы достичь Чуви. Но когда данные об итогах выборов достигнут потомков Чуви и они обновят его книгу истории, его коллекцию прошлых списков *сейчас*, они увидят, что итоги выборов входят в тот же список настоящего, в котором Чуви поднялся с кресла и отправился гулять по направлению к Земле. Этот список настоящего, отметят потомки Чуви, появляется моментом позже списка, который содержит вас в начале XXI в., в тот самый момент, когда вы дочитываете этот абзац.

Этот пример подчёркивает два важных момента. Первый: хотя мы использовали мысль о том, что релятивистские эффекты становятся очень заметными при скоростях, близких скорости света, но даже при малых скоростях релятивистские эффекты чрезвычайно усиливаются, когда рассматриваются очень большие расстояния. Второй: пример позволяет проникнуть в проблему: является ли пространство-время (буханка) действительно чем-то существующим или просто абстрактной концепцией, абстрактным объединением пространства прямо *сейчас* вместе с его историей и подразумеваемым будущим.

Вы видите, что концепция реальности, которую принимает Чуви, его замороженный образ текущего мгновения, ничем не хуже концепции реальности, которую принимаете вы. Так что если при определении того, что представляет собой реальность, мы не учтём его точку зрения, то получим чрезвычайно узкое представление. Для Ньютона такой равноправный подход не мог привести к каким-либо различиям, поскольку во Вселенной с абсолютным пространством и абсолютным временем слои настоящего совпадают для всех наблюдателей. Но в релятивистской Вселенной, нашей Вселенной, различия велики. Поскольку наша обычная концепция того, что существует прямо сейчас, включает только один слой настоящего — мы обычно видим прошлое, как уже ушедшее, и будущее, как ещё не наступившее, — то мы должны расширить этот образ, включив слой настоящего Чуви, т. е. мы должны включить такой слой настоящего, который, как показало обсуждение, может существенно отличаться от нашего собственного. Более того, поскольку начальное положение Чуви и его скорость движения произвольны, мы должны включить слои настоящего, связанные со всеми возможностями. Эти слои настоящего будут центрированы на положении Чуви или на положении некоторого другого реального или гипотетического наблюдателя в пространстве и будут поворачиваться на угол, который зависит от выбранной скорости. (Единственное ограничение следует из предела скорости, установленной

светом, и, как объяснено в примечаниях, в использованном нами графическом представлении это соответствует ограничению угла поворота сорока пятью градусами по или против часовой стрелки). Как вы видите, на рис. 5.5 собрание всех слоёв настоящего заполняет солидную область пространственно-временной буханки. Фактически, если пространство бесконечно — если слои настоящего простираются в бесконечность, — то поворачивающиеся слои настоящего могут быть центрированы произвольно далеко, и поэтому их объединение замечает (при повороте) каждую точку блока пространства-времени. ^[34]

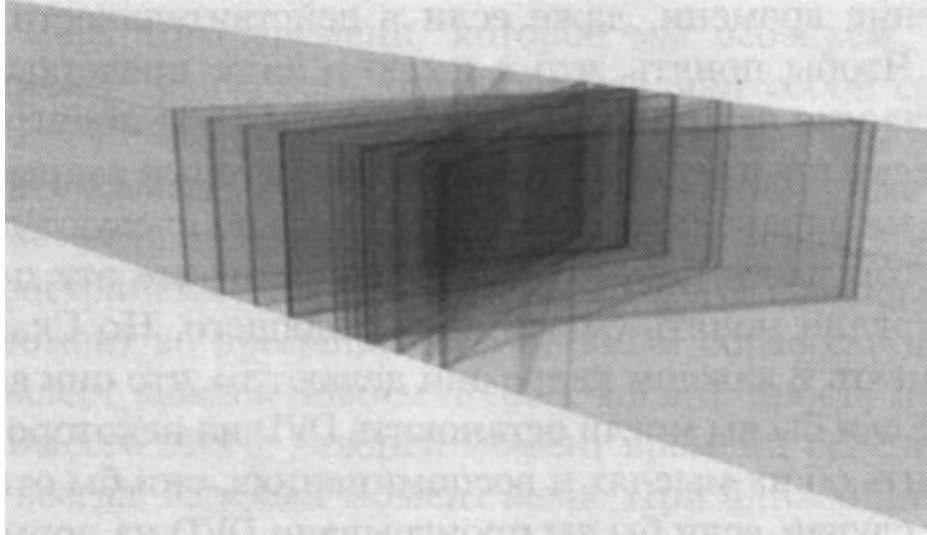


Рис. 5.5. Пример слоёв настоящего для различных наблюдателей (реальных или гипотетических), находящихся на различных расстояниях от Земли идвигающихся с различными скоростями

Итак: если вы принимаете идею, что реальность состоит из вещей в вашей замороженной мысленной картинке, представляющей текущий момент времени, и вы согласны, что ваше настоящее не более действительно, чем настоящее кого-то, кто располагается далеко от вас и кто может свободно двигаться, то реальность включает в себя все события в пространстве-времени. Существует весь блок пространства-времени. Точно так же, как мы представляем всё пространство реально существующим не только здесь, мы должны представлять и всё время реально существующим не только теперь. Прошрое, настоящее и будущее явно выглядят как различные сущности. Но, как сказал однажды Эйнштейн, «Как нас убедили физики, разница между прошлым, настоящим и будущим есть только иллюзия, хотя и стойкая» ^{62}. Единственная вещь,

которая реальна, — это пространство-время в целом.

Опыт и течение времени

В рамках таких представлений различные события, независимо от того, когда они происходят, с любой частной точки зрения, просто *есть*. Все они существуют. Они вечно занимают свою особую точку в пространстве-времени. Здесь нет течения. Если вы провели замечательное время в полночь накануне нового 1999 г., вы всё ещё там, поскольку это просто одно неизменное место в пространстве-времени. Трудно принять такое описание, поскольку наше мировоззрение жёстко проводит различие между прошлым, настоящим и будущим. Но если мы внимательно посмотрим на нашу привычную темпоральную схему и противопоставим ей холодные упрямые факты современной физики, то единственный приют для привычных представлений, кажется, находится в человеческом сознании.

Неоспоримо, что наше сознание способно перемещаться по слоям времени. Это происходит, когда наш разум высвечивает прошлое, так что моменты времени оживают, когда их освещает сила сознания. Ощущение течения от одного момента времени к следующему возникает из нашего сознательного распознавания изменений в наших мыслях, чувствах и ощущениях. И эта последовательность изменений, кажется, непрерывно движется; кажется, что она разворачивается в связанную историю. Но, без какой бы то ни было претензии на психологическую или нейробиологическую точность, можно представить, как мы можем ощущать течение времени, даже если в действительности и нет такого феномена. Чтобы понять, что я имею в виду, представим просмотр фильма «Унесённые ветром» на неисправном DVD-проигрывателе, который хаотически прыгает вперёд и назад: некоторые кадры вспыхивают на мгновение на экране, а за ними моментально следуют другие из совершенно другой части фильма. Когда вы смотрите эту перепутанную версию, вам трудно понять смысл происходящего. Но Скарлетт и Рэтт проблем не имеют. В каждом кадре они делают то, что они всегда делали в этом кадре. Если бы вы могли остановить DVD на некотором отдельном кадре и спросить об их мыслях и воспоминаниях, они бы ответили то же самое, что и в случае, если бы вы проигрывали DVD на нормально функционирующем проигрывателе. Если бы вы спросили, не сбивают ли их с толку события Гражданской войны не в том порядке, они бы

недоумённо посмотрели на вас и решили бы, наверное, что вы выпили лишнего. В любом данном кадре они имеют мысли и память, которые всегда имели в этом кадре, — и, в частности, эти мысли и память будут давать им ощущение, что время гладко и последовательно течёт вперёд, как обычно.

Аналогично, каждый момент в пространстве-времени — каждый временной слой — похож на один из кадров в фильме. Он существует независимо от того, освещает ли его некий свет. Так же как для Скарлетт и Рэтта, для вас, находящихся в любом таком моменте, это и есть *сейчас*, это есть момент, который вы ощущаете в *это* мгновение. И так будет всегда. Более того, внутри каждого индивидуального слоя ваши мысли и память достаточно богаты, чтобы создать ощущение, что время непрерывно текло к этому моменту. Это чувство, это ощущение течения времени не требует, чтобы предыдущий момент, предыдущий кадр, был «освещён в правильном порядке». ^{63}

Если вы подумаете об этом ещё немного, то поймёте, что это очень хорошо, поскольку представление о том, что свет прожектора последовательно оживляет моменты времени, чрезвычайно проблематично по другой, даже более важной причине. Если свет прожектора правильно выполняет свою работу и освещает данный момент — скажем, наступление полуночи в канун нового 1999 г., — что будет означать для этого момента затем уйти в темноту? Если момент времени был освещён, то «быть освещённым» становится свойством этого момента, свойством таким же вечным и неизменным, как всё другое, происходящее в этот момент. Подвергнуться освещению — быть «оживлённым», быть настоящим, быть *сейчас* — и затем подвергнуться темноте — быть «скрытым», быть прошлым, быть тем, что было, — значит подвергнуться изменению. Но понятие изменения не имеет смысла по отношению к отдельному моменту времени. Изменение должно возникать с течением времени, изменение должно отмечать прохождение времени, и разве можно это согласовать с представлением об изменении в один момент времени? По определению, моменты *не* включают прохождение времени — по меньшей мере того времени, которое мы осознаём, — поскольку моменты времени просто есть, они представляют собой сырой материал времени, они *не* изменяются. Отдельный момент может изменяться во времени не больше, чем отдельное положение может изменяться в пространстве: если положение сдвинулось, это будет уже другое положение в пространстве; если момент во времени изменился, это будет уже другой момент во времени. Интуитивный образ света прожектора, который вызывает каждое

новое *сейчас* к жизни, просто не выдерживает проверку. Вместо этого, каждый момент времени освещён и остаётся освещённым всегда. Каждый момент *есть*. При ближайшем рассмотрении текущая река времени больше напоминает гигантский блок льда, причём каждый момент навечно заморожен в своё место.^[64]

Эта концепция времени существенно отличается от той, к которой большинство из нас привыкло. Эйнштейн не остался равнодушен к трудности восприятия столь глубокого изменения в представлениях. Рудольф Карнап^[65] подробно изложил примечательный разговор, который состоялся с Эйнштейном по этому поводу: «Эйнштейн сказал, что проблема настоящего его сильно беспокоит. Он объяснил, что ощущение настоящего означает для человека нечто специальное, нечто существенно отличное от прошлого и будущего, но что это важное отличие не возникает или не может возникнуть в рамках физики. То, что это ощущение не может быть охвачено наукой, казалось ему фактом болезненного, но неизбежного поражения».

Эта уступка оставляет открытым главный вопрос: действительно ли наука не в состоянии охватить фундаментальное свойство времени, которое человеческий разум видит так же легко, как лёгкие вдыхают воздух, или человеческий разум наделяет время свойством своего собственного, человеческого, изготовления, причём таким, что это свойство является искусственным и поэтому не отражается в законах физики? Если вы зададите мне этот вопрос в течение рабочего дня, я примкну к последней точке зрения, но с наступлением ночи, когда критическое мышление смягчается до обычной жизненной рутины, становится трудно сохранять полную невосприимчивость к первой точке зрения. Время — тонкая вещь, и мы далеки от полного его понимания. Возможно, что некоторая проницательная личность однажды придёт к новому взгляду на время и откроет настоящее физическое обоснование его течения.

И тогда приведённое выше обсуждение, основанное на логике и теории относительности, снова может оказаться полной чепухой. Однако чувство течения времени определённо глубоко укоренилось в наших ощущениях и заполняет наше мышление и язык. До такой степени, что мы прибегали и будем продолжать прибегать к обычному, разговорному образу текущего времени. Но нельзя смешивать язык и реальность. Человеческий язык намного лучше приспособлен для описания человеческого опыта, чем для выражения глубоких физических законов.

Глава 6. Случайность и стрела времени

Имеет ли время направление?

Даже если время не течёт, всё же можно спросить, имеет ли оно направление — имеется ли направление пути, на котором события разворачиваются во времени, имеется ли такое направление, которое можно разглядеть в законах физики. Имеется ли некоторый внутренний порядок в том, как события разбросаны вдоль пространства-времени, и имеется ли существенное научное отличие между таким упорядочением событий и обратным упорядочением? Как каждому известно, огромное различие такого рода определённо имеется; это то, что придаёт жизни перспективу и делает острыми переживания. Но, как мы увидим, объяснение различия между прошлым и будущим труднее, чем вы думали. Замечательно, что ответ, который мы установим, окажется тесно связанным с точными условиями в начале Вселенной.

Загадка

Тысячу раз в день наш опыт обнаруживает различие между прямым и обратным ходом времени. Очень горячая пицца остывает по дороге от пиццерии, но мы никогда не найдём пиццы ещё горячее, чем в момент, когда она была вынута из духовки. Сливки, размешанные в кофе, образуют однородную желтовато-коричневую жидкость, но мы никогда не увидим чашку кофе со сливками, размешанного «назад» и разделённого на белые сливки и чёрный кофе. Яйца падают, разбиваясь и разбрызгиваясь, но мы никогда не увидим расплескавшиеся желток с белком и скорлупки, собирающиеся вместе и объединяющиеся в целое яйцо. Сжатый в бутылке колы углекислый газ вырывается наружу, когда мы откручиваем крышку, но мы никогда не найдём рассеявшийся углекислый газ собравшимся воедино и втянувшимся обратно в бутылку.

Кубик льда, брошенный в стакан воды комнатной температуры, тает, но мы никогда не увидим молекулы в стакане воды комнатной температуры, объединившиеся в твёрдый кубик льда. Эти общие последовательности событий, как и бесчисленные другие, происходят только в одном временном порядке. Они никогда не происходят в обратном порядке, поэтому они обеспечивают представление о *до* и *после* — они

дают нам непротиворечивую и кажущуюся универсальной концепцию прошлого и будущего. Эти наблюдения убеждают нас, что если бы мы исследовали всё пространство-время, находясь снаружи (как на рис. 5.1), мы бы увидели существенную асимметрию вдоль оси времени. Разбившиеся яйца во всём мире будут лежать с одной стороны — стороны, которую мы обычно называем будущим, — по отношению к их целым предкам.

Возможно, наиболее поучительный вывод из всех этих примеров состоит в том, что наш разум имеет доступ к собранию событий, которые мы называем прошлым, — к нашей памяти, — но никто из нас не способен вспомнить набор событий, который мы называем будущим. Очевидно, существует большая разница между прошлым и будущим. Кажется, что наблюдается явное направление в том, как огромное разнообразие вещей разворачивается во времени. Кажется, что есть явное различие между вещами, которые мы можем вспомнить (прошлое), и вещами, которые мы вспомнить не можем (будущее). Это и есть то, что мы подразумеваем под наличием у времени ориентации, направления или стрелы.^[66]

Физика, как и наука в целом, основывается на регулярности. Учёные изучают природу, ищут повторяющиеся образцы и кодируют эти образцы в законах природы. Вы могли бы поэтому подумать, что совершенно исключительная регулярность, которая с очевидностью приводит нас к ощущению стрелы времени, будет иметь отражение в фундаментальном законе природы. Наивный способ формулировки такого закона будет заключаться во введении Закона разливающегося молока, согласно которому чашки молока разливаются, но не «сливаются» назад, или Закона разбивающихся яиц, согласно которому яйца разбиваются, но никогда не собираются обратно. Но законы такого рода нам ничего не дают: это просто описание, оно не предлагает никакого объяснения кроме простого наблюдения за тем, что происходит. Мы же ожидаем, что где-то в глубинах физики должен быть менее наивный закон, описывающий движение и свойства частиц, который увязывает пиццу, молоко, яйца, кофе, людей и звёзды — фундаментальные составляющие всего — и который показывает, почему события развиваются в определённом порядке, но никогда в обратном. Такой закон дал бы фундаментальное объяснение наблюдаемой стреле времени.

В полное недоумение приводит то, что никто не открыл такого закона. Более того, законы физики, которые были сформулированы Ньютоном, затем Максвеллом и Эйнштейном и до сегодняшних дней, *демонстрируют*

полную симметрию между прошлым и будущим.^[35] Ни в одном из этих законов мы не найдём оговорки, что они применимы в одном направлении во времени, но не в другом. Нигде нет никакого различия между тем, как законы выглядят или ведут себя, когда они применяются к тому или иному направлению времени. Законы рассматривают то, что мы называем прошлым и будущим, совершенно одинаково. Хотя опыт снова и снова выявляет направление, в котором события разворачиваются во времени, эта стрела, кажется, не находит отражения в фундаментальных законах физики.

Прошлое, будущее и фундаментальные законы физики

Как такое может быть? Неужели законы физики не объясняют, чем прошлое отличается от будущего? Как может быть, что нет закона физики, который объяснял бы, почему события разворачиваются в этом порядке, но никогда не в обратном?

Ситуация более чем загадочна. Известные законы физики на самом деле декларируют — в отличие от нашего жизненного опыта, — что кофе со сливками можно разделить на чёрный кофе и белые сливки; растёкшийся желток и мелкие осколки скорлупы могут собраться вместе и воссоздать совершенно целое яйцо; растаявший в стакане воды лёд при комнатной температуре может превратиться в кубик льда; газ, выделившийся при открытии колы, может вернуться назад в бутылку. Все физические законы, которые мы бережно храним, полностью поддерживают симметрию по отношению к обращению времени. Это означает, что если некоторая последовательность событий может разворачиваться в одном временном порядке (сливки и кофе смешиваются, яйца разбиваются, газ улетучивается), то эти события могут разворачиваться и в обратном порядке (сливки и кофе разделяются, яйца восстанавливаются, газ втягивается назад). В дальнейшем я это конкретизирую, но обобщение одной фразой таково: известные законы не только не способны сказать нам, почему мы видим события развивающимися только в одном порядке, они также говорят нам, что теоретически события могут разворачиваться и в обратном порядке.^[36]

Животрепещущий вопрос таков: *почему мы никогда этого не видим?* Я думаю, можно смело заключать пари, что никто никогда на самом деле не был свидетелем восстановления разбитого яйца.

Но если законы физики допускают это, и более того, если эти законы рассматривают разбивание и восстановление яйца одинаково, то почему

одно никогда не происходит, в то время как другое имеет место?

Симметрия по отношению к обращению времени

В качестве первого шага к решению этой головоломки нам надо понять в более конкретных терминах, что означает для известных законов физики быть симметричными по отношению к обращению времени. С этой целью представьте, что идёт XXV в. и вы играете в теннис в новой межпланетной лиге с вашим партнёром по имени Вильямс «Мощный удар». Немного не привыкший к уменьшенной гравитации Венеры, «Мощный удар» делает сильнейший удар слева и запускает мяч в глубокую темноту пространства. Пересекающий пространство космический шаттл производит киносъёмку мяча, когда тот пролетает рядом, и посылает ленту в CNN (Celestial News Network — небесная сеть новостей) для телевидения. Возникает вопрос: если техники CNN сделали ошибку и запустили плёнку о теннисном мяче в обратном направлении, есть ли какой-нибудь способ это определить? Если вы знали направление и ориентацию камеры во время съёмок, то вы будете в состоянии распознать их ошибку. Но смогли бы вы распознать ошибку, просмотрев только саму плёнку без дополнительной информации? Ответ: нет. Если в правильном направлении времени (вперёд) плёнка показывает мяч летящим слева направо, то в обратном направлении он будет показан летящим справа налево. И, конечно, законы классической физики позволяют теннисным мячам двигаться как налево, так и направо. Так что движение, которое вы видите, когда плёнка прокручивается как в прямом, так и в обратном направлении, превосходно согласуется с законами физики.

Пока мы считали, что на теннисный мяч не действуют никакие силы, поэтому он движется с постоянной скоростью. Рассмотрим теперь более общую ситуацию, включив силы. Согласно Ньютону, влияние силы заключается в изменении скорости объекта: силы сообщают ускорения. Представим, что после некоторого времени плавания в пространстве мяч попадает под влияние гравитационного притяжения Юпитера, что заставляет его двигаться с возрастающей скоростью по нисходящей дуге, развёрнутой направо к поверхности Юпитера, как показано на рис. 6.1а и б. Если вы проигрываете плёнку с этим движением в обратном направлении, теннисный мяч будет двигаться по дуге, которая развёрнута вверх и налево от Юпитера, как на рис. 6.1в.

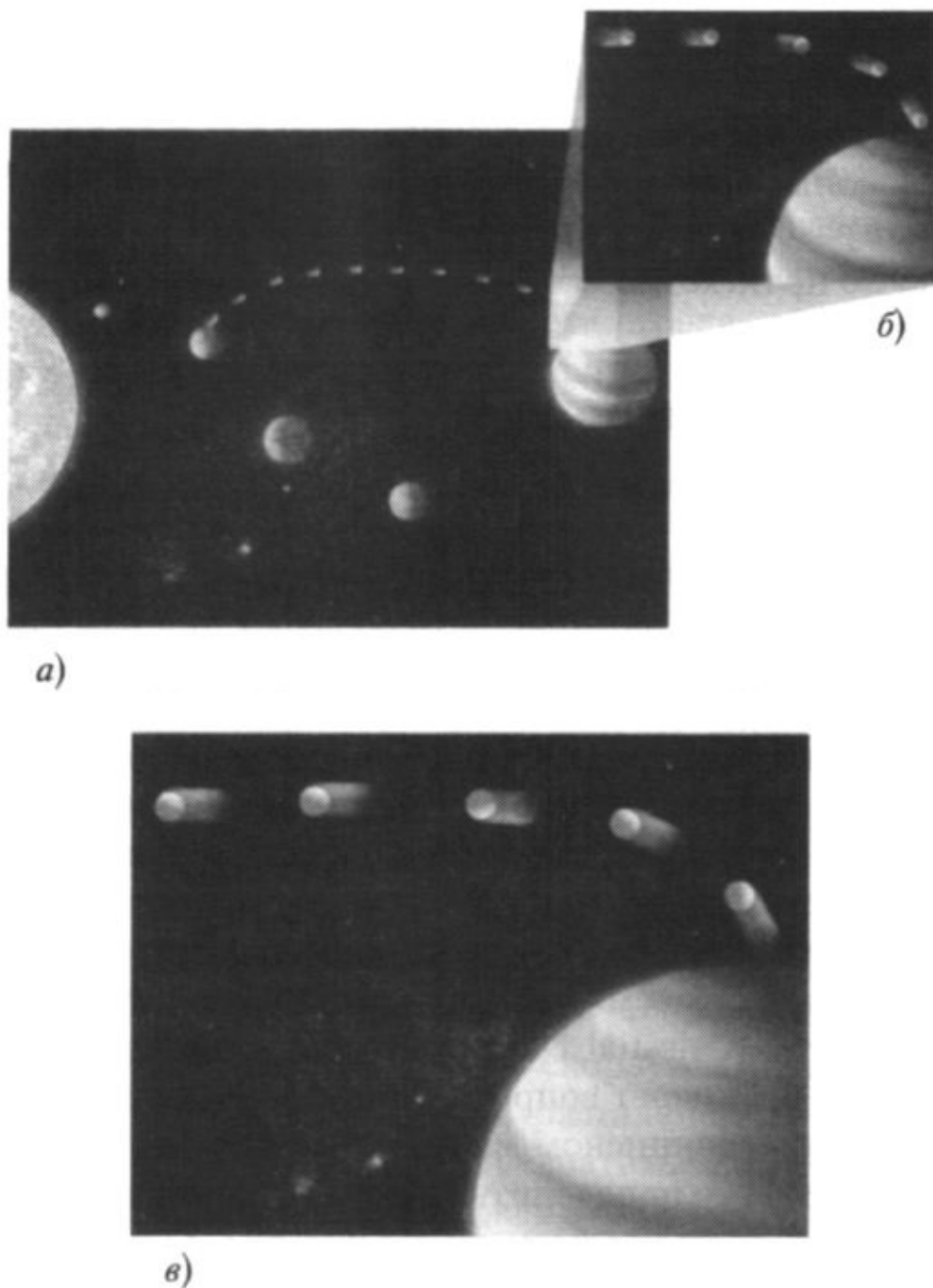


Рис. 6.1. (а) Теннисный мяч, летящий от Венеры к Юпитеру. (б) Окончание полёта. (в) Движение теннисного мяча, если его скорость изменена на противоположную прямо перед столкновением с Юпитером

Возникает новый вопрос: является ли движение, демонстрируемое на

плёнке, которая проигрывается в обратном направлении, — движение, обратное во времени по отношению к движению, в действительности снятому на плёнку, — допустимым по классическим законам физики? Может ли такое движение произойти в реальном мире? На первый взгляд, ответ «да» кажется очевидным: теннисные мячи могут двигаться по нисходящим дугам направо, или по восходящим дугам налево, или по бесконечному количеству других траекторий. Тогда в чём трудность? Хотя ответ, несомненно, «да», наши рассуждения поверхностны и упускают реальную суть вопроса.

Когда вы начинаете прокручивать плёнку в обратном направлении, вы видите, как теннисный мяч отскакивает от поверхности Юпитера и начинает двигаться вверх и налево в точности с той же скоростью (но в точности в противоположном направлении), с которой он падал на планету.

Начальная часть плёнки определённо согласуется с законами физики: например, мы можем представить, что кто-то запустил теннисный мяч с поверхности Юпитера с точно такой же скоростью. Существенный вопрос состоит в том, будет ли и *оставшаяся* часть обратного движения также согласовываться с законами физики. Будет ли мяч, запущенный с этой начальной скоростью и подвергающийся воздействию притягивающей вниз гравитации Юпитера, действительно двигаться вдоль траектории, изображённой на оставшейся части прокручиваемой в обратном направлении плёнки? Будет ли он в точности очерчивать его оригинальную нисходящую траекторию, но в обратном направлении?

Ответ на этот уточнённый вопрос — *да*. Во избежание путаницы, разберёмся более детально. На рис. 6.1а, перед тем, как гравитация Юпитера оказала существенное влияние, мяч двигался точно вправо. Далее, на рис. 6.1б мощная гравитационная сила захватила мяч и притянула его к центру планеты — притяжение, которое в большей степени направлено вниз, но, как вы можете видеть на рисунке, частично вправо. Это означает, что когда мяч приблизился к поверхности Юпитера, его ориентированная вправо скорость немного увеличилась, а компонента скорости, направленная вниз, значительно увеличилась. Следовательно, в прокручиваемой назад плёнке взлёт мяча с поверхности Юпитера будет происходить в направлении немного *влево* и преимущественно *вверх*, как показано на рис. 6.1 в.

При этой стартовой скорости гравитация Юпитера будет оказывать максимальное влияние на скорость мяча, направленную вверх, делая её всё меньше и меньше, тогда как скорость мяча, направленная влево, тоже будет уменьшаться, но в меньшей степени. И с быстро уменьшающейся

компонентой скорости, направленной вверх, движение мяча будет становиться преимущественно таким, при котором преобладает скорость, направленная влево, что вынудит мяч следовать влево по выгнутой вверх траектории. Вблизи окончания этой дуги гравитация истощит всё направленное вверх движение, также как и добавочную скорость, направленную вправо, которую гравитация Юпитера добавила мячу во время его пути вниз, оставив движение мяча в направлении влево в точности с той же скоростью, которую он имел при его первоначальном приближении к Юпитеру.

Всё это можно просчитать, но суть в том, что эта траектория в точности совпадает с обратным начальным движением мяча. Просто изменив скорость мяча на противоположную, как на рис. 6.1в, — отправив его в путь с той же скоростью, но в противоположном направлении, — его можно заставить пройти полностью свою исходную траекторию, но в обратном направлении. Возвращаясь к плёнке, мы видим, что выгнутая вверх траектория, направленная влево, — траектория, которую мы просто сконструировали, основываясь на ньютоновских законах движения, — в точности совпадает с той, что мы видели при прокручивании плёнки назад. Так что движение мяча с обращением времени, как изображено на прокручиваемой назад плёнке, согласуется с законами физики так же хорошо, как и его движение в прямом времени. Движение, которое мы видели, прокручивая плёнку в обратном направлении, есть движение, которое на самом деле может происходить в реальном мире.

Хотя имеется несколько тонкостей, которые я переношу в примечания, этот вывод является общим.^[67] Все известные и признанные законы, относящиеся к движению, — от уже обсуждавшейся выше ньютоновской механики до электромагнитной теории Максвелла и специальной и общей теории относительности Эйнштейна (вспомним, что мы исключили из рассмотрения квантовую механику до следующей главы) — заключают в себе симметрию по отношению к обращению времени: движение, которое может происходить в обычном направлении, соответствующем прямому ходу во времени, может так же происходить и в обратном направлении. Поскольку терминология несколько запутанная, позвольте ещё раз подчеркнуть, что мы не изменяем направление самого времени. Время действует так же, как и всегда. Наши выводы таковы, что *мы можем заставить объект пройти его траекторию в обратном направлении путём простой процедуры обращения его скорости в любой точке на его пути*. Иными словами, обращение скорости объекта в некоторой точке его пути заставит объект совершить движение, которое мы видели на

прокручиваемой назад плёнке.

Теннисные мячи и разбивающиеся яйца

Наблюдение за теннисным мячом, проносящимся между Венерой и Юпитером — в том или другом направлении, — не является особенно интересным. Но поскольку вывод, к которому мы пришли, широко применим, отправимся теперь в более интересное место: на вашу кухню. Положите яйцо на кухонный стол, подтолкните его к краю и позвольте ему упасть на пол и разбиться. Несомненно, в этой последовательности событий имеется много разных движений. Яйцо падает. Скорлупа трескается. Желток разливается. Половицы вибрируют. Формируются вихри в окружающем воздухе. Трение вызывает нагревание, влияющее на атомы и молекулы яйца, пола и воздуха, заставляя их дрожать немного быстрее. И точно так же, как законы физики показывают нам, что мы можем отправить теннисный мяч очерчивать его собственный путь точно в обратном направлении, те же самые законы показывают, что мы можем заставить каждый кусочек яичной скорлупы, каждую каплю желтка, каждую половицу и каждый пузырь воздуха точно проделать его движение в обратном направлении. «Всё», что нам необходимо сделать, это поменять направление скорости всех и каждой из составляющих процесса разбивания яйца на обратное. Более точно, рассуждения, использованные в примере с теннисным мячом, означают, что если гипотетически мы были бы в состоянии одновременно поменять на обратную скорость *каждого* атома и молекулы, вовлечённых прямо или косвенно в процесс разбивания яйца, *все* движения в процессе разбивания яйца будут происходить в обратном направлении.

Опять-таки, точно как с теннисным мячом, если мы сумеем обратить все эти скорости, то, что мы увидим, будет похоже на плёнку, прокручиваемую в обратном направлении. Но, в отличие от теннисного мяча, обращение движения разбивающегося яйца будет чрезвычайно впечатляющим. Волна колеблющихся молекул воздуха и мельчайшие сотрясения пола соберутся в месте падения яйца со всех частей кухни, заставив переместиться кусочки скорлупы и капли желтка к месту удара. Каждый ингредиент будет двигаться в точности с той же скоростью, которую он имел в исходном процессе разбивания яйца, но каждый будет теперь двигаться в противоположном направлении. Капли желтка будут лететь назад и собираться в шарик, как и зазубренные края осколков

скорлупы будут точно встраиваться друг в друга для соединения в гладкий яйцевидный контейнер. Колебания пола и воздуха будут точно состыкованы с движениями бесчисленных соединяющихся капель желтка и кусочков скорлупы, чтобы дать заново сформированное яйцо, которое одним толчком подпрыгнет с пола в виде одного целого, взлетит на кухонный стол, мягко приземлится на его край с достаточным вращательным движением, чтобы откатиться на несколько дюймов и элегантно вернуться к начальному состоянию покоя. Это всё будет происходить, если мы решим задачу тотального и точного обращения скоростей всего, что было задействовано в процессе.^[68]

Так что, является ли событие простым, вроде полёта теннисного мяча по дуге, или чем-то более сложным, вроде разбивания яйца, законы физики показывают — то, что происходит в одном временном направлении, может, по крайней мере в принципе, происходить также и в обратном.

Принцип и практика

Истории о теннисном мяче и яйце не просто иллюстрируют симметрию по отношению к обращению времени в законах природы. Они также наводят на мысль, почему в реальном мире многие вещи происходят одним способом, но никогда не происходят в обратном направлении. Нетрудно было заставить теннисный мяч повторить свой путь назад. Мы просто схватили его и направили с той же самой скоростью, но в обратном направлении. Вот и всё. Но заставить все хаотические остатки яйца воспроизвести их пути назад будет куда сложнее. Мы должны схватить каждый кусочек разбитого яйца и одновременно направить его с той же скоростью, но в противоположном направлении. Ясно, что это находится за пределами того, что мы (или вся королевская конница и вся королевская рать) реально можем сделать.

Нашли ли мы ответ, который искали? Связана ли причина того, почему яйца разбиваются, но не собираются обратно, хотя оба действия допускаются законами физики, с тем, что осуществимо, а что не осуществимо на практике? Не состоит ли ответ на вопрос просто в том, что яйцо легко разбить — катнуть его по столу, — но чрезвычайно трудно заставить его собраться обратно?

Но если бы это был ответ, поверьте мне, я не стал бы делать из этого большой проблемы. Противопоставление простоты и сложности является существенной частью ответа, но вся история намного более тонка и

удивительна. В своё время мы вернёмся к ней, но сначала необходимо придать всему обсуждению в этой главе большую строгость. Это приводит нас к концепции энтропии.

Энтропия

На могильном камне Центрального кладбища в Вене, рядом с могилами Бетховена, Брамса, Шуберта и Штрауса, выгравировано простое уравнение $S = k \log W$ которое выражает математическую формулировку важного понятия, известного как *энтропия*. На могильном камне начертано имя Людвиг Больцмана, одного из наиболее проницательных физиков, работавших на рубеже XIX и XX столетий. В 1906 г., с подорванным здоровьем и страдая от депрессии, Больцман совершил самоубийство, находясь на отдыхе со своей женой и дочерью в Италии. По иронии судьбы, всего несколькими месяцами позже эксперименты, начатые для подтверждения идей Больцмана, пылко отстаивая которые, он растратил свою жизнь, оказались успешными.

Понятие энтропии впервые было введено во время промышленной революции учёными, исследовавшими работу печей и паровых двигателей. Эти исследования послужили началом новой науки — термодинамики. После многих лет исследований основополагающие идеи термодинамики были предельно уточнены, получив окончательную формулировку в подходе Больцмана. Его интерпретация энтропии, лаконично выраженная в уравнении на его надгробии, использует статистический подход для установления связи между огромным числом отдельных компонентов, составляющих физическую систему, и общими свойствами, которые имеет эта система.^[69]

Чтобы почувствовать эти идеи, представим себе переплетённое издание романа «Война и мир», на отдельных 693 листах. Подбросим их высоко в воздух, а затем соберём аккуратно в стопку.^[70] Когда вы проверите собранную пачку, то с огромной вероятностью обнаружите, что страницы расположены не по порядку. Причина очевидна. Имеется множество вариантов, в которых порядок страниц будет перепутан, но существует лишь один вариант, при котором порядок правильный. Конечно, по порядку — это значит, что страницы должны быть расположены в точности 1, 2; 3, 4; 5, 6 и т. д., вплоть до 1385, 1386. Любое другое расположение будет не по порядку. Простое, но существенное наблюдение заключается в том, что чем большим числом равноправных способов что-то

может произойти, тем более вероятно, что оно произойдёт. А если нечто может произойти *огромным* числом способов, вроде как для страниц приземлиться в неправильном порядке, то в *огромной* степени более вероятно, что именно так и произойдёт. Интуитивно мы все это знаем. Если вы покупаете один лотерейный билет, есть только один способ выиграть. Если вы купите миллион билетов, каждый со своим номером, то будет миллион способов выиграть, так что ваши шансы разбогатеть будут в миллион раз выше.

Энтропия — это понятие, которое придаёт точность этой идее путём подсчёта количества способов, согласующихся с законами физики, которыми может быть реализована данная физическая ситуация. *Высокая энтропия означает, что имеется много способов; низкая энтропия означает, что имеется мало способов.* Если страницы книги расположены в правильном числовом порядке — это низкоэнтропийная конфигурация, поскольку имеется одно и только одно расположение, удовлетворяющее этому критерию. Если страницы находятся не в правильном порядке — это высокоэнтропийная ситуация, поскольку небольшой расчёт показывает, что имеется

1245521984537783433660029353704988291633611012463890451368876 — приблизительно 10^{1878} — различных неупорядоченных расстановок страниц.^[71] Если вы подбросили страницы в воздух, а затем собрали их в аккуратную стопку, практически всегда они будут сложены беспорядочно, поскольку такие конфигурации имеют более высокую энтропию — имеется намного больше способов получить неупорядоченный результат, чем исключительное расположение, в котором страницы находятся в правильном числовом порядке.

В принципе, мы могли бы воспользоваться законами классической физики, чтобы точно определить, где приземлится каждая страница после того, как целая пачка была подброшена в воздух. Тогда, снова в принципе, мы могли бы точно предсказать итоговое расположение страниц^[72] и поэтому (в отличие от квантовой механики, которую мы игнорируем до следующей главы) могло бы показаться, что нет необходимости полагаться на вероятностные понятия, вроде того, какой результат является более или менее вероятным по сравнению с другими. Но статистические понятия являются как мощными, так и полезными. Если бы «Война и мир» была памфлетом из пары страниц, мы могли бы успешно завершить необходимые вычисления, но это будет невозможно сделать для настоящей книги «Война и мир».^[73] Отслеживание точного движения 693 гибких

листов бумаги, когда они подхватываются воздушными потоками, соприкасаются, скользят и толкают друг друга, будет монументальной задачей, далеко лежащей за пределами возможностей даже самых мощных суперкомпьютеров.

Более того — и это существенно — точный ответ не так уж важен. Когда вы исследуете окончательную стопку страниц, вы гораздо меньше интересуетесь подробностями, какая страница где оказалась, чем главным вопросом, расположились ли страницы в правильном порядке. Если расположились — прекрасно. Вы сможете, как обычно, сесть и продолжить чтение про Анну Павловну и Николая Ильича Ростовых. Но если вы обнаружили, что страницы в неправильном порядке, точные детали расположения страниц, вероятно, будут заботить вас меньше всего. Если вам попалось одно неупорядоченное расположение страниц, вы в значительной степени имеете представление обо всех. За исключением случаев, когда по некоторым странным причинам вы погрязли в мелочах, выясняя, каким страницам пришлось появиться в стопке здесь или там, вы едва ли заметите, что кто-то внёс ещё дополнительную путаницу в то неправильное расположение страниц, которое вы имели в начале. Начальная стопка будет выглядеть неупорядоченной, и ещё раз перемешанная стопка тоже будет выглядеть неупорядоченной. Так что обсуждение на статистическом уровне не только значительно легче провести, но и ответ, который оно даёт, — упорядоченное против неупорядоченного, — более важен по сути, более важен по отношению к тому, на что мы обычно обращаем внимание.

Такая разновидность укрупнённого мышления является центральной для статистических оснований энтропийных рассуждений. Точно так же, как любой лотерейный билет имеет те же шансы на выигрыш, что и любой другой, после многих подбрасываний страниц книги любое частное расположение страниц столь же вероятно, что и любое другое. Что делает статистические рассуждения уместными, так это то, что имеется два *представляющих интерес класса* конфигураций страниц: упорядоченные и неупорядоченные. Первый класс имеет одно представление (правильное расположение страниц 1, 2; 3, 4 и т. д.), тогда как второй класс имеет гигантское число представлений (любое другое возможное расположение страниц). Эти два класса составляют разумный набор для использования, поскольку, как сказано выше, они дают адекватную макроскопическую оценку, которую можно сделать, рассматривая любое данное расположение страниц.

Вы можете предложить сделать более тонкое разграничение между

этими двумя классами, рассматривая расположения с несколькими выпадающими из правильного порядка страницами, с неупорядоченными страницами только из первой главы и т. д. Фактически, иногда может оказаться полезным рассмотрение таких промежуточных классов. Однако число возможных расположений страниц в каждом из этих новых подклассов всё ещё крайне мало по сравнению с числом расположений во всём неупорядоченном классе. Например, полное число неупорядоченных расположений, включающих только страницы из первой части романа «Война и мир», составляет 10^{-178} от одного процента от полного числа неупорядоченных расположений, включающих все страницы. Так, хотя при начальном подбрасывании переплетённой книги итоговое расположение страниц будет, вероятнее всего, частью одного из промежуточных, не полностью разупорядоченных классов, но если вы повторите процедуру подбрасывания много раз, почти наверняка порядок страниц в конечном счёте не будет демонстрировать каких-либо очевидных закономерностей. Порядок страниц эволюционирует в направлении к полностью неупорядоченному классу, поскольку имеется очень много расположений страниц, которые удовлетворяют данному требованию.

Пример с романом «Война и мир» выявляет две существенные особенности энтропии. Первая особенность: *энтропия есть мера количества беспорядка в физической системе*. Высокая энтропия означает, что имеется много перестановок составляющих частей системы, которые пройдут незамеченными. С другой стороны, это означает, что система сильно неупорядочена (когда страницы романа все перемешаны, любое дальнейшее их перепутывание будет едва ли заметно, поскольку просто оставляет страницы в перемешанном состоянии). Низкая энтропия означает, что очень немного перестановок пройдут незамеченными. С другой стороны, это означает, что система высокоупорядочена (когда страницы романа находятся в правильном порядке, вы легко обнаружите любую перестановку). Вторая особенность состоит в том, что в физических системах с большим числом составных частей (например, в книгах со многими страницами, подбрасываемых в воздух) имеется естественная эволюция по направлению к большему беспорядку, поскольку беспорядок может возникнуть гораздо большим числом способов, чем порядок. На языке энтропии это утверждение означает, что физические системы имеют тенденцию развиваться по направлению к состояниям с более высокой энтропией.

Конечно, делая понятие энтропии точным и универсальным, физическое определение энтропии не имеет дела с подсчётом числа

перестановок страниц той или иной книги, которые оставляют её упорядоченной или неупорядоченной. Вместо этого подсчитывается число перестановок фундаментальных составляющих — атомов, субатомных частиц и т. д., — которое оставляет макроскопические, крупномасштабные свойства данной физической системы неизменными. Как и в примере с романом *«Война и мир»*, низкая энтропия означает, что только незначительное число перестановок останутся незамеченными, так что система высокоупорядочена, тогда как высокая энтропия означает, что много перестановок не будут замечены, что означает, что система сильно неупорядочена.^[37]

В качестве физического примера, причём такого, который можно легко проверить, подумаем об упомянутой ранее бутылке колы. Когда углекислый газ, изначально находящийся в бутылке, в конечном счёте распространяется по комнате, имеется *множество* перестановок отдельных молекул этого газа, которые не будут иметь заметного эффекта. Например, если вы машете руками, молекулы углекислого газа будут двигаться туда-сюда, быстро изменяя положения и скорости. Но в целом не будет никакого качественного влияния на их расположение. Молекулы были распределены однородно до того, как вы взмахнули руками, и они останутся однородно распределёнными после того, как вы это сделали. Конфигурация однородно распределённого газа нечувствительна к огромному числу перестановок молекулярных составляющих, поэтому газ находится в состоянии с высокой энтропией. Напротив, если газ распределён в меньшем пространстве, как это было в бутылке, или удерживается заслонкой в углу комнаты, он будет иметь существенно более низкую энтропию. Причина проста. Точно так же, как более тонкая книга имеет меньше способов перестановки страниц, меньшее пространство обеспечивает меньше мест, где молекулы могут размещаться, и, следовательно, допускает меньше перестановок молекул.

Но когда вы откручиваете крышку бутылки или удаляете заслонку, вы открываете целую новую Вселенную для молекул газа, и через столкновения и соударения они быстро рассеиваются, чтобы эту Вселенную «исследовать». Почему? По тем же самым статистическим причинам, как и в случае страниц романа *«Война и мир»*. Нет сомнений, что некоторые из соударений будут толкать молекулы в сторону исходного плотного облака газа. Но, поскольку объём комнаты превышает объём исходного облака газа, имеется *гораздо* больше перестановок, доступных молекулам, когда они уходят из облака, чем для случая, когда они остаются в облаке. Тогда в среднем молекулы газа будут разбегаться из исходного

облака и постепенно достигнут состояния однородного распределения по комнате. Так что относительно низкоэнтропийная исходная конфигурация, в которой весь газ собран в малой области, естественным образом эволюционирует в направлении относительно высокоэнтропийной конфигурации, в которой газ однородно распределён в большем пространстве. И однажды достигнув такой однородности, газ будет иметь тенденцию поддерживать это состояние высокой энтропии: столкновения и соударения всё ещё заставляют молекулы двигаться туда-сюда, вызывая замену одной перестановки на другую, но сильно преобладают такие перестановки, которые не влияют на макроскопические свойства газа. Вот что означает иметь высокую энтропию. ^{74}

В принципе, как и со страницами романа «Война и мир», мы можем использовать законы классической физики, чтобы точно определить, где в данный момент времени будет находиться каждая молекула углекислого газа. Но вследствие огромного числа молекул CO_2 — около 10^{24} в бутылке колы — в действительности провести такие вычисления практически невозможно. И даже если каким-то образом мы были бы в состоянии сделать это, обладание списком из миллионов миллиардов миллиардов положений и скоростей частиц мало дало бы для понимания того, как распределены молекулы. Концентрация внимания на крупномасштабных статистических свойствах — рассеялся газ или сжался, т. е. имеет ли он высокую или низкую энтропию — намного более информативна.

Энтропия, второй закон и стрела времени

Тенденция физической системы эволюционировать в направлении состояния с более высокой энтропией известна как *второй закон термодинамики*. (Первый закон — это привычный закон сохранения энергии.) Как отмечалось выше, основанием для закона является простое статистическое рассуждение: для системы имеется больше способов иметь более высокую энтропию, и «больше способов» означает, что более вероятным является то, что система будет эволюционировать в одну из этих высокоэнтропийных конфигураций. Хотя отметим, что это не есть закон в обычном смысле, поскольку что-то может перейти из состояния с высокой энтропией в состояние с низкой. Однако такие случаи маловероятны и встречаются редко. Когда вы подбрасываете в воздух перепутанную пачку страниц, а затем собираете её в аккуратную стопку, *может* произойти возврат к правильному числовому порядку. Вы не захотите заключить пари

на большую сумму, что это произойдёт, но это возможно. Также возможно, что столкновения и соударения приведут к тому, что весь рассеянный углекислый газ будет двигаться согласованно и втянется назад в вашу открытую бутылку колы. Не надо, затаив дыхание, ожидать такого исхода, но такое *может* произойти. ^[75]

Большое число страниц романа «Война и мир» и большое число молекул газа в комнате являются тем, что делает разницу энтропий между неупорядоченными и упорядоченными расположениями настолько огромной, что приводит к чрезвычайно малой вероятности низкоэнтропийных исходов того или иного процесса. Если вы неоднократно подбрасываете в воздух только два двусторонних листа, вы обнаружите, что они опустятся в правильном порядке примерно в 12,5% случаев. С тремя листами эта величина упадёт примерно до 2%, с четырьмя листами — примерно до 0,3%, с пятью листами — примерно до 0,03%, с шестью листами — примерно до 0,002%, с десятью листами — до 0,000000027%. С 693 листами процент подбрасываний, которые будут приводить к правильному порядку, настолько мал (он содержит так много нулей после запятой), что издатель убедил меня не использовать полстраницы, чтобы записать его явно. Аналогично, если вы запустили две молекулы газа бок о бок в пустую бутылку из-под колы, вы обнаружите, что при комнатной температуре хаотическое движение молекул будет сводить их вместе обратно (на расстоянии миллиметра друг от друга) в среднем примерно каждые несколько секунд. Для группы из трёх молекул вы будете ждать день, для четырёх молекул вы будете ждать год, а для исходного плотного сгустка из миллиона миллиардов миллиардов молекул потребуется время, намного превышающее текущий возраст Вселенной, чтобы их хаотическое движение свело их вместе назад в маленький упорядоченный сгусток. С большей уверенностью, чем в неизбежности смерти и налогов, мы можем считать, что системы с большим числом составляющих эволюционируют к беспорядку.

Хотя это может быть не сразу очевидно, но мы подошли к интригующему моменту. Второй закон термодинамики, кажется, дал нам стрелу времени, *которая появляется, когда физические системы имеют большое число составляющих*. Если вы посмотрите плёнку о двух молекулах углекислого газа, которые разместились в малом объёме (с подсветкой траекторий, показывающей движения каждой из них), вам будет трудно сказать, прокручивалась ли плёнка в прямом или в обратном направлении. Две молекулы будут летать там и сям, временами собираясь вместе, временами удаляясь, но они не будут представлять

макроскопическое поведение, различающее одно направление во времени от обратного. Однако если вы увидите плёнку, на которой 10^{24} молекул углекислого газа собрались вместе в малом объёме (скажем, в виде маленького плотного облака молекул), вы легко определите, прокручивалась ли плёнка в прямом или обратном направлении. Наиболее вероятно, что прямое направление времени — это когда молекулы газа становятся более и более однородно распределёнными, *достигая всё большей и большей энтропии*. Если вместо этого плёнка показывает однородный рассеянный газ молекул, который стягивается вместе в тесную группу, вы немедленно поймёте, что смотрите плёнку в обратном направлении.

По существу, те же рассуждения годятся для всех явлений, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни — для явлений, которые имеют большое число составляющих, стрела времени указывает в направлении роста энтропии. Если вы смотрите фильм о стакане воды со льдом на столе, вы можете определить, какое направление является прямым во времени, отметив, что лёд тает, — молекулы H_2O льда распределяются по всему стакану, следовательно, достигают более высокой энтропии. Если вы смотрите фильм о разбивающемся яйце, вы можете определить, какое направление является прямым во времени, проверив, что составляющие яйца становятся всё более и более разупорядоченными, — что яйцо скорее разбивается, чем собирается обратно, следовательно, также стремясь к более высокой энтропии.

Как вы видите, понятие энтропии даёт точную версию заключения «простота против сложности», которую мы нашли раньше. Страницам романа «Война и мир» легко нарушить правильный порядок, так как имеется *очень много* неупорядоченных расположений. Для страниц трудно попасть в совершенный порядок, поскольку сотни страниц должны будут двигаться очень специальным способом, чтобы упасть в уникальной последовательности, которую задумывал Л. Н. Толстой. Яйцу легко разбиться, так как существует много способов разбиться. Яйцу трудно собраться воедино, поскольку огромное число разбрызганных составляющих должны будут двигаться в совершенной координации, чтобы воспроизвести уникальный результат в виде неповреждённого яйца, покоящегося на столе. Для тел с большим числом составляющих легко переходить от низкой энтропии к высокой — от порядка к беспорядку, — что всегда и происходит. Двигаться от высокой энтропии к низкой — от беспорядка к порядку — труднее, поэтому такое происходит в лучшем

случае редко.

Отметим также, что энтропийная стрела не является совершенно жёсткой; не утверждается, что это определение направления времени надёжно на все 100%. Напротив, этот подход имеет достаточно гибкости, чтобы позволить тем или иным процессам иногда идти в обратном направлении. Поскольку второй закон декларирует, что рост энтропии является только статистически вероятным, но не непременным свойством природы, он допускает с малой вероятностью, что страницы могут выпасть в правильном числовом порядке, что молекулы газа могут влезть обратно в бутылку, а яйца могут восстанавливаться. Используя математику энтропии, второй закон в точности выражает, насколько статистически невероятны такие события (вспомните гигантское число в предыдущем разделе, показывающее, насколько более вероятно, что страницы романа «*Война и мир*» лягут в беспорядке), но он признаёт, что они могут происходить.

Это выглядит довольно убедительно. Статистические и вероятностные аргументы дают нам второй закон термодинамики. В свою очередь, второй закон обеспечивает нас интуитивным различием между тем, что мы называем прошлым, и тем, что мы называем будущим. Он даёт нам практическое объяснение, почему явления повседневной жизни, которые обычно состоят из огромного числа составляющих, начинаются *так*, а заканчиваются *эдак*, в то время как мы никогда не видим их начинающимися *эдак*, а заканчивающимися *так*. Но по прошествии многих лет — и благодаря огромному вкладу таких физиков, как лорд Кельвин, Джозеф Лошмидт, Анри Пуанкаре, С. Х. Бербери, Эрнст Цермело и Вильярд Гиббс, — Людвиг Больцман пришёл к пониманию, что история стрелы времени ещё более удивительна. Больцман понял, что, хотя энтропия и проясняет важные аспекты головоломки, она *не* отвечает на вопрос, почему прошлое и будущее кажутся столь различными. Вместо этого энтропия переопределяет сам вопрос столь существенным способом, что это ведёт к неожиданным заключениям.

Энтропия: прошлое и будущее

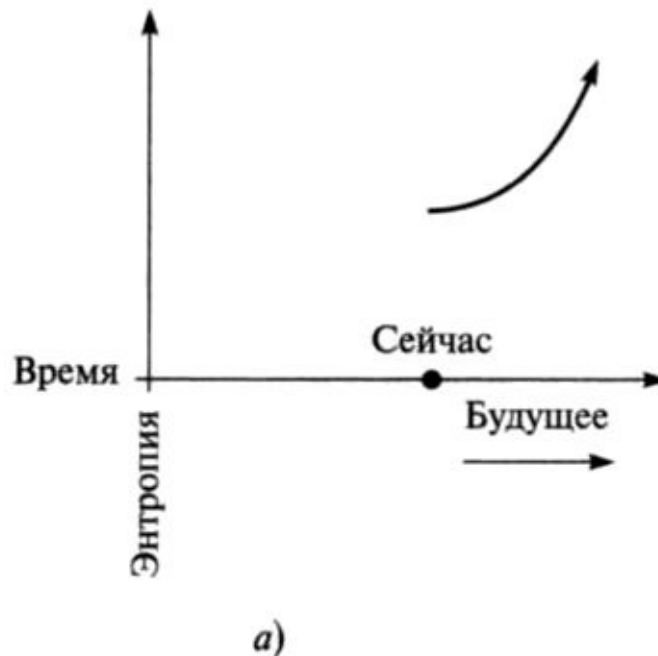
Ранее мы ввели дилемму прошлого и будущего путём сравнения наших повседневных наблюдений со свойствами ньютоновских законов классической физики. Мы подчеркнули, что постоянно ощущаем очевидную направленность пути, по которому всё развивается во времени, но сами законы трактуют то, что мы называем прямым и обратным

направлением во времени, совершенно одинаковым способом. Так как в рамках законов физики нет стрелы, которая обозначает направление во времени, нет указания, требующего: «Используйте этот закон в данной временной ориентации, но не в обратной», мы приходим к вопросу: если законы, лежащие в основе опыта, трактуют обе ориентации времени симметрично, почему сам опыт (ощущения) так односторонен во времени, всегда происходя в одном направлении, но никогда в обратном? Откуда возникает наблюдаемая и ощущаемая направленность времени?

В последнем разделе нам казалось, что мы добились определённого прогресса, используя второй закон термодинамики, который явно выделяет будущее как направление, в котором энтропия возрастает. Но после дальнейших размышлений всё оказывается не так просто. Отметим, что в нашем обсуждении энтропии и второго закона мы никаким способом не меняли законы классической физики. Всё, что мы сделали, — это использовали законы в «крупномасштабных» статистических рамках: мы проигнорировали тонкие детали (точный порядок переплетённых страниц романа «Война и мир», точные положения и скорости составляющих яйца, точные положения и скорости молекул CO_2 в бутылке колы), а, напротив, сконцентрировали наше внимание на макроскопических, обобщающих свойствах (страницы упорядочены или нет, яйцо разбито или нет, молекулы газа рассеяны или не рассеяны). Мы выяснили, что в достаточно сложных физических системах (книги с большим числом страниц, хрупкие объекты, которые могут разбиться на множество осколков, газ с большим числом молекул) имеется огромное отличие в энтропии между упорядоченными и неупорядоченными конфигурациями. А это значит, что имеется огромная вероятность того, что системы будут эволюционировать от более низкой к более высокой энтропии, что, грубо говоря, и является утверждением второго закона термодинамики. Но ключевым фактом, на который надо обратить внимание, является то, что второй закон — *производный*: он просто является следствием вероятностных рассуждений, применённых к ньютоновским законам движения.

Это приводит нас к простому, но поразительному выводу: *поскольку ньютоновские законы физики не имеют встроенной временной ориентации, все аргументы, которые мы использовали для обоснования, что системы будут развиваться от более низкой к более высокой энтропии по направлению в будущее, работают одинаково хорошо, если их применить в направлении прошлого*. Ещё раз, так как фундаментальные

законы физики имеют симметрию по отношению к обращению времени, для них нет способа даже отличить то, что мы называем прошлым, от того, что мы называем будущим. Точно так же, как нет указательного столба в глубокой темноте пустого пространства, который объявляет, что это направление — вверх, а то — вниз, в законах классической физики нет ничего, что называло бы одно направление во времени будущим, а другое направление во времени прошлым. Законы не предлагают временной ориентации; это отличие, к которому они полностью нечувствительны. А поскольку законы движения ответственны за то, как изменяются вещи, — как в направлении, которое мы называем будущим, так и в направлении, которое мы называем прошлым, — статистические/вероятностные рассуждения, стоящие за вторым законом термодинамики, применимы в равной степени к обоим временным направлениям. Следовательно, *имеется не только подавляющая вероятность того, что энтропия физической системы будет больше в том направлении, что мы называем будущим, но имеется такая же подавляющая вероятность, что она будет больше в направлении, которое мы называем прошлым.* Мы показали это на рис. 6.2.



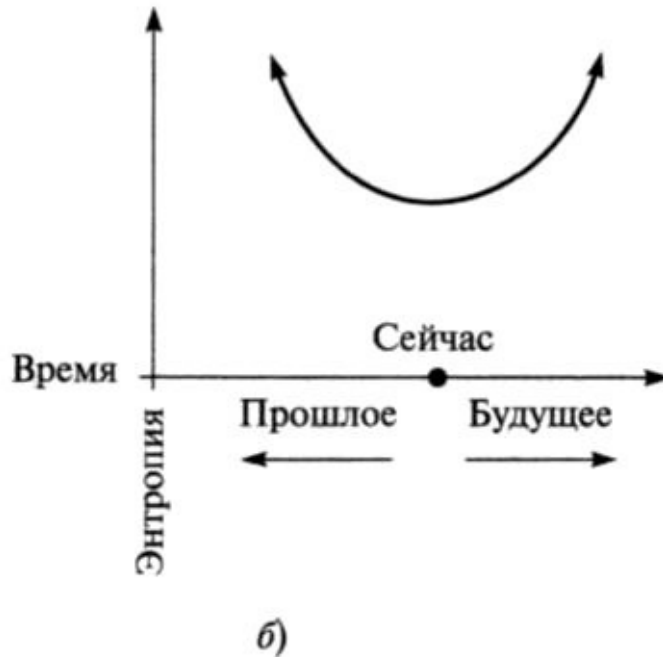


Рис. 6.2. (а) Как обычно пишут, второй закон термодинамики подразумевает, что энтропия возрастает по направлению в будущее от любого заданного момента. (б) Поскольку известные законы природы рассматривают направления вперёд и назад во времени как совершенно равноправные, второй закон в действительности означает, что энтропия возрастает как в направлении будущего, так и в направлении прошлого от любого заданного момента

Это *ключевой* момент для всего, что последует дальше, но он также обманчиво прост. Обычное неправильное понимание второго закона состоит в том, что если, в соответствии со вторым законом термодинамики, энтропия возрастает по направлению в будущее, тогда энтропия неизбежно *уменьшается* по направлению в прошлое. Но это не так. Второй закон в действительности говорит, что если в некоторый данный момент времени, которым мы интересуемся, физическая система ещё не достигла максимально возможной энтропии, то чрезвычайно вероятно, что физическая система будет впоследствии иметь *и* раньше имела больше энтропии. Это суть рис. 6.2б. С законами, которые не видят различия прошлого от будущего, такая симметрия времени неизбежна.

Это важный урок. Он говорит нам, что энтропийная стрела времени *двунаправлена*. От любого заданного момента стрела энтропии

демонстрирует рост в направлении будущего *и* в направлении прошлого. В связи с этим явно затруднительно предлагать энтропию в качестве объяснения однонаправленной стрелы ощущаемого времени.

Подумаем о том, что двунаправленная энтропийная стрела времени означает в конкретных случаях. Если сегодня тёплый день и вы видите частично растаявший кубик льда в стакане воды, вы совершенно уверены, что на полчаса позже кубик будет ещё более растаявшим, поскольку чем больше он растаял, тем большей энтропией он обладает.^[76] Но вы будете иметь *точно* такую же уверенность, что на полчаса раньше он был также более растаявший, поскольку *точно* такие же статистические рассуждения подразумевают, что энтропия должна возрастать по направлению в прошлое. И такое же заключение применимо к бесчисленному множеству других примеров, с которыми мы сталкиваемся каждый день. Ваше убеждение, что энтропия возрастает по направлению в будущее, — что частично рассеявшийся газ будет рассеиваться и дальше, что частично перепутанный порядок страниц будет перепутываться ещё больше, — должно соответствовать *точно* такой же уверенности, что энтропия была также выше и в прошлом.

Неприятность состоит в том, что половина из этих заключений кажется совершенно неверной. Энтропийные рассуждения дают точные и осмысленные заключения, когда они применяются в одном направлении времени, а именно в направлении того, что мы называем будущим, но дают, очевидно, ошибочные и кажущиеся нелепыми заключения, когда они применяются в направлении того, что мы называем прошлым. Стакан воды при комнатной температуре с частично растаявшими кубиками льда обычно не начинает свою эволюцию как стакан воды без льда, так что молекулы сами по себе начинают сначала охлаждаться и собираться вместе в кубик льда, чтобы в момент наблюдения начать таять снова. Разрозненные страницы романа «Война и мир» обычно не начинают перегруппировываться от полного числового беспорядка, чтобы через последовательность подбрасываний стать менее перепутанными и лишь затем начать снова перепутываться больше. И, возвращаясь на кухню, когда разбивается яйцо, мы обычно не наблюдаем, что сначала осколки собираются в целое яйцо, чтобы оно снова разбилось чуть позже.

Или такое бывает?

Следуя за математикой

Столетия научных исследований показали, что математика даёт мощный и точный язык для анализа Вселенной. И действительно, история современной науки насыщена примерами, в которых математика делала предсказания, которые казались противоречащими как интуиции, так и ощущениям (Вселенная содержит чёрные дыры, во Вселенной есть антиматерия, удалённые частицы могут быть запутаны и т. д.), но которые, в конце концов, были подтверждены наблюдениями и экспериментами. Такие разработки сами по себе оставили глубокий след в культуре теоретической физики. Физики пришли к пониманию, что математика, использованная с должной аккуратностью, является проверенной дорогой к истине.

Поэтому, когда математический анализ законов природы показал, что энтропия должна возрасть как по направлению в будущее, *так и* по направлению в прошлое от любого данного момента времени, физики не выбросили это из головы. Нечто, похожее на клятву Гиппократу в физике, побуждает исследователей сохранять глубокий и здравый скептицизм относительно обманчивой истинности человеческого опыта и с тем же скептическим отношением старательно следовать за математикой и смотреть, куда она приведёт. Только тогда мы можем правильно оценить и интерпретировать любые остающиеся противоречия между физическими законами и здравым смыслом.

С этой целью представим, что сейчас 10:30 вечера и последние полчаса вы сидите, уставившись на стакан воды со льдом (в баре спокойный вечер), наблюдая, как кубики медленно тают, превращаясь в маленькие бесформенные кусочки. Вы абсолютно не сомневаетесь, что полчаса назад бармен положил в стакан совершенно правильные кубики льда; вы не сомневаетесь, потому что вы доверяете своей памяти. И если в силу каких-то обстоятельств ваше убеждение относительно того, что произошло за последние полчаса, будет поколеблено, вы можете спросить парня напротив, который также наблюдал за кубиками льда (в баре действительно спокойный вечер), или вообще исследовать запись, снятую камерой наблюдения бара. Оба источника подтвердят, что ваша память в порядке. И если вы спросите себя, что, как вы ожидаете, произойдёт с кубиками льда в течение следующей половины часа, вы, вероятно, придёте к заключению, что они будут продолжать таять. А если вы достаточно знакомы с понятием энтропии, вы объясните ваше предсказание, обратив внимание на то, что с подавляющей вероятностью энтропия будет возрасть от того значения, которое она имеет прямо сейчас, в 10:30 вечера, по направлению в будущее. Всё это вполне осмысленно и совпадает

с нашей интуицией и ощущениями.

Но, как мы видели, такие энтропийные рассуждения — рассуждения, из которых попросту следует, что вещи скорее всего будут разупорядочиваться, так как для беспорядка существует больше возможностей, чем для порядка; рассуждения, которые убедительны и сильны при объяснении того, как события разворачиваются по направлению к будущему, — эти рассуждения декларируют, что энтропия так же вероятно будет больше и в прошлом. Это должно означать, что частично растаявшие кубики льда, которые вы видите в 10:30 вечера, были на самом деле ещё *более* растаявшими в более ранние времена; это должно означать, что в 10:00 вечера они не начали с твёрдых кубиков льда, а, напротив, медленно собрались из воды с комнатной температурой к 10:30 вечера, и так же верно они медленно растают до воды комнатной температуры к 11:00 вечера.

Нет сомнений, это звучит странно — или даже вы скажете «ненормально». По большому счёту, не только молекулы H_2O в стакане воды при комнатной температуре должны спонтанно собраться в частично сформированные кубики льда, но и цифровым сигналам в камере наблюдения, а также нейронам в вашем мозге и в мозге парня напротив, всем им надо будет спонтанно выстроиться к 10:30 так, чтобы подтвердить, что имелось собрание сформированных кубиков льда, которые таяли, даже если этого никогда не было. К тому же, этот необычный вывод возник там, где добросовестное применение энтропийных рассуждений — тех же рассуждений, которые вы принимали без колебаний для объяснения, почему частично растаявший лёд, который вы видели в 10:30 вечера, продолжит таять до 11:00 вечера, — проведено симметричным во времени образом, требуемым законами физики. Эта неприятность возникает, когда мы имеем дело с фундаментальными законами движения, которые не имеют встроенного различия между прошлым и будущим, с законами, математика которых трактует будущее и прошлое от любого данного момента в точности одним и тем же способом. ^[77]

Остаётся надеяться, что мы скоро найдём выход из того странного положения, в которое нас поставило равноправное использование энтропийных рассуждений; я не пытаюсь убедить вас, что ваша память и записи содержат прошлое, которого никогда не было (извиняюсь перед фанатами «*Матрицы*»). Но такой подход будет очень полезен для точного разделения интуиции и математических законов. Итак, двигаемся дальше.

Затруднительное положение

Ваша интуиция отказывает прошлому с более высокой энтропией, поскольку при разворачивании событий в обычном направлении во времени требуется спонтанное возрастание порядка: молекулы воды спонтанно замерзают до 0°C и переходят в лёд, рассудок спонтанно обзаводится воспоминаниями о событиях, которые не происходили, видеокамеры спонтанно производят образы вещей, которых никогда не было, и т. д. — всё это кажется чрезвычайно маловероятным — предполагаемое объяснение прошлого, над которым посмеялся бы даже Оливер Стоун^[38]. Здесь физические законы и математика энтропии полностью согласуются с вашей интуицией. Такая последовательность событий, которая была бы видна в прямом направлении времени с 10:00 до 10:30 вечера, шла бы против сути второго закона термодинамики — что привело бы к уменьшению энтропии, — а это, хотя и не невозможно, но очень маловероятно.

Напротив, ваша интуиция и ощущения говорят вам, что намного более вероятна такая последовательность событий, в которой кубики льда, которые были полностью сформированы в 10:00 вечера, частично растаяли до того состояния, которое вы наблюдаете в своём стакане прямо сейчас в 10:30 вечера. Но на этом этапе физические законы и математика энтропии только отчасти согласуются с вашими ожиданиями. Математика и интуиция сходятся в том, что *если* на самом деле в 10:00 вечера полностью сформировались кубики льда, тогда наиболее вероятная последовательность событий будет для них состоять в том, что они частично растают к 10:30 вечера: результирующий рост энтропии соответствует как второму закону термодинамики, так и ощущениям. Но в чём математика и интуиция расходятся, так это в том, что наша интуиция, в отличие от математики, не может дать или даёт неверную оценку вероятности того, что в 10:00 вечера кубики действительно были полностью сформированы, *исходя из единственного наблюдения, которое мы принимаем как неоспоримое и вполне надёжное, что прямо сейчас в 10:30 вечера вы видите частично растаявшие кубики.*

Это центральный момент, так что позвольте мне объяснить. Главный урок второго закона термодинамики состоит в том, что физические системы имеют подавляющую тенденцию находиться в конфигурациях с высокой энтропией, поскольку имеется много способов, которыми такие состояния могут реализоваться. И однажды попав в такие

высокоэнтропийные состояния, физические системы имеют подавляющую тенденцию оставаться в них. Высокая энтропия является естественным состоянием системы. Вам никогда не придётся удивляться или чувствовать необходимость объяснения, почему некоторая физическая система находится в высокоэнтропийном состоянии. Такие состояния являются нормой. Наоборот, нужно объяснять, почему физическая система находится в состоянии порядка, в состоянии с низкой энтропией. Такие состояния ненормальны, хотя определённо они могут возникать. Но с точки зрения энтропии такие упорядоченные состояния являются редкими отклонениями, которые требуют объяснения. Так что один факт в нашем эпизоде, который мы принимаем как неоспоримо правильный, — ваше наблюдение в 10:30 вечера низкоэнтропийных частично сформированных кубиков льда, — фактически нуждается в объяснении.

С точки зрения вероятности абсурдно объяснять это низкоэнтропийное состояние, призывая ещё менее энтропийное состояние, *ещё менее вероятное* состояние, в котором в 10:00 вечера наблюдались *ещё более упорядоченные, ещё лучшие сформированные* кубики льда. Вместо этого значительно более вероятно, что всё начинается с обыкновенного, вполне нормального высокоэнтропийного состояния: стакан однородной жидкой воды абсолютно без какого бы то ни было льда. Затем, через маловероятную статистическую флуктуацию, стакан воды идёт против требований второго закона термодинамики и эволюционирует в состояние с низкой энтропией, в котором появляются частично сформированные кубики льда. Эта эволюция, хотя и требует редких и необычных процессов, избегает состояний с ещё меньшей энтропией, ещё менее вероятного, ещё более редкого состояния, в котором кубики льда *полностью* сформированы. В любой момент между 10:00 и 10:30 вечера этой странно выглядящей эволюции соответствует *более высокая* энтропия, чем при нормальном сценарии таяния льда, как вы можете видеть на рис. 6.3. Так что она реализует полученное в 10:30 вечера наблюдение способом, который *более вероятен* (намного более вероятен), чем сценарий, в котором тают полностью сформированные кубики льда. ^[78] Вот в чём загадка. ^[39]



Рис. 6.3. Сравнение двух возможных вариантов того, как кубики льда приходят к частично растаявшему состоянию в 10:30 вечера. Вариант 1 (нижняя кривая) соответствует вашей памяти о тающем льде, но требует относительно низкой энтропии в начальной точке в 10:00 вечера. Вариант 2 (верхняя кривая) противоречит вашей памяти, описывая частично растаявший лёд, который вы видите в 10:30 вечера, как самопроизвольно собравшийся из стакана воды. Сценарий 2 стартует в 10:00 вечера из состояния с высокой энтропией, т. е. из сильно разупорядоченного состояния с высокой вероятностью реализации. Каждый этап пути по направлению к 10:30 вечера согласно варианту 2 включает состояния, которые более вероятны, чем аналогичные состояния варианта 1, — поскольку, как вы можете видеть на графике, они имеют более высокую энтропию, — так что вариант 2 статистически более

предпочтителен

Больцману оставался маленький шаг, чтобы осознать, что такому же анализу может быть подвергнута Вселенная целиком. Когда вы сейчас обзрываете Вселенную, то, что вы видите, отражает великий результат биологической организации, химического структурирования и физического упорядочения. Хотя Вселенная могла бы быть совершенно беспорядочным хаосом, но это не так. Почему? Откуда происходит такой порядок? Так же, как с кубиком льда, с точки зрения вероятности, крайне маловероятно, что Вселенная, которую мы видим, эволюционирует из ещё более упорядоченного — ещё менее вероятного — состояния в далёком прошлом, которое медленно развилось до его текущей формы. Поскольку космос имеет очень много составляющих, масштабы упорядоченного по сравнению с неупорядоченным интенсивно увеличиваются. Итак, что правильно для бара, тем более должно быть правильно для всей Вселенной: *намного* более вероятно — настолько, что захватывает дух, — что вся Вселенная, которую мы видим, появилась как редкая статистическая флуктуация из нормальной, обыкновенной, высокоэнтропийной, совершенно неупорядоченной конфигурации.

Подумаем об этом таким образом: если вы снова и снова подбрасываете горсть монет, рано или поздно они все лягут вверх «орлом». Если вы обладаете почти бесконечным терпением, необходимым для подбрасывания снова и снова перепутанных страниц романа *«Война и мир»* в воздух, рано или поздно они лягут в правильном порядке номеров. Если вы подождёте с вашей открытой бутылкой колы, рано или поздно хаотические столкновения молекул углекислого газа заставят их залезть назад в бутылку. И, к удовлетворению Больцмана, если Вселенная ожидает достаточно долго — может быть, близко к бесконечности, — её обычное, высокоэнтропийное, высоковероятное, полностью разупорядоченное состояние из-за собственных столкновений, соударений и хаотических течений частиц и радиации рано или поздно просто соберётся в конфигурацию, которую мы наблюдаем сейчас. Наши тела и мозги должны были появиться полностью сформированными из хаоса — с запасом памяти, знаний и умений, — хотя прошлое, которое всё это отражает, никогда в действительности не имело место. Всё, что мы знаем, всё, что мы ценим, будет итогом ничего иного, как редкой статистической флуктуации, на мгновение возмущившей почти бесконечный беспорядок. Это схематически показано на рис. 6.4.

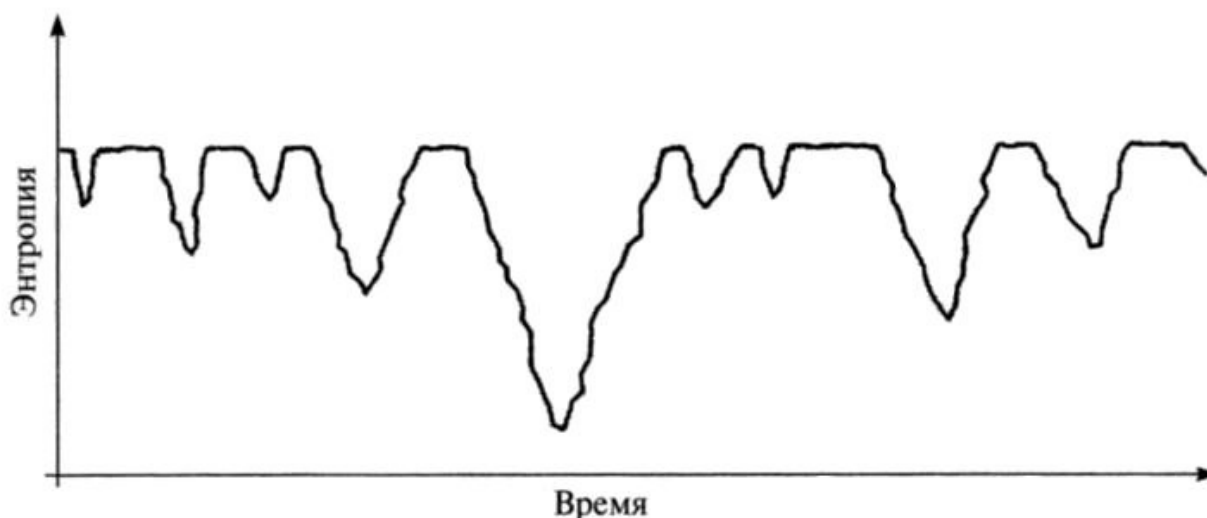


Рис. 6.4. Схематический график полной энтропии Вселенной по времени. График показывает Вселенную, проводящую большую часть своего времени в состоянии полного разупорядочения — состоянии высокой энтропии, — и редкие флуктуации до состояний с различной степенью порядка и более низкой энтропией. Чем больше энтропийный провал, тем менее вероятна флуктуация. Существенные провалы в энтропии, вроде той упорядоченности, которую мы видим в сегодняшней Вселенной, экстремально маловероятны и могут возникать крайне редко

Делая шаг назад

Я был несколько шокирован, когда впервые столкнулся с этой идеей много лет назад. Вплоть до того момента я думал, что довольно хорошо понимаю концепцию энтропии, но дело в том, что, следуя учебникам, которые я изучал, я всегда рассматривал приложения энтропии только для будущего. Но, как мы только что видели, в то время как рост энтропии в приложении к будущему подкрепляет нашу интуицию и ощущения, рост энтропии в приложении к прошлому совершенно противоречит им. Может быть это и не настолько плохо, как если бы вы вдруг узнали, что вас предал старый друг, но для меня это было похоже.

Тем не менее иногда хорошо проводить судебное разбирательство не слишком быстро, и очевидная неспособность энтропии соответствовать ожиданиям представляет как раз тот самый случай. Как вы, вероятно,

думаете, мысль о том, что всё, с чем мы знакомы, просто вдруг появилось, настолько же привлекательна, сколь и тяжела для принятия. И это не «просто потому», что такое объяснение Вселенной оспаривает достоверность всего, что мы считаем реальным и важным. Без ответа остаются и критические вопросы. Например, чем более упорядоченной Вселенная является сегодня — чем больше провал на рис. 6.4, — тем более удивительным и невероятным является статистическое отклонение, которое требуется, чтобы привести к его возникновению. Так что если бы Вселенная могла срезать углы, делая сразу так, чтобы вещи более или менее выглядели похожими на то, что мы сейчас видим, одновременно экономя на реальном количестве порядка, то вероятностные рассуждения приводили бы нас к уверенности, что она так и делает. Но когда мы исследуем Вселенную, то кажется, что имеется большое количество потерянных возможностей, поскольку имеется много вещей, которые более упорядочены, чем должны быть. Если бы Майкл Джексон не записал песню «Триллер», и многие миллионы копий этого альбома, которые распространились по всему миру, стали частью аномальной флуктуации в направлении более низкой энтропии, то отклонение было бы намного менее экстремальным, если бы были сформированы только миллион, или полмиллиона или только несколько альбомов. Если эволюция никогда не происходила, и мы, люди, возникли здесь благодаря аномальному скачку в направлении более низкой энтропии, отклонение было бы намного менее экстремальным, если бы не существовало такой последовательной и упорядоченной записи эволюции в окаменелостях. Если Большой взрыв никогда не происходил и более чем 100 млрд галактик, которые мы видим сегодня, возникли как аномальный скачок в сторону более низкой энтропии, отклонение было бы менее экстремальным, если бы было 50 млрд, или 5000, или только несколько, или только одна галактика. Итак, если идея, что наша Вселенная является статистической флуктуацией — счастливой случайностью, — имеет хотя бы некоторые основания, необходимо обратиться к вопросу, как и почему Вселенная зашла так далеко и достигла состояния *такой* низкой энтропии.

Ещё более тягостно, если вы в самом деле не можете доверять памяти и записям, тогда вы также не можете доверять и законам физики. Их применимость основывается на многочисленных экспериментах, положительные результаты которых проверяются только теми же самыми памятью и записями. Так что все без исключения рассуждения, основанные на симметрии законов физики относительно обращения времени, должны быть поставлены под вопрос, подрывая при этом наше понимание

энтропии и все основы настоящего обсуждения. Принимая вывод, что Вселенная — это редкая статистическая флуктуация из конфигурации полного беспорядка, мы быстро попадём в затруднительное положение, в котором теряется всякое понимание, включая ту самую цепочку рассуждений, которая и привела нас к рассмотрению такого эксцентричного объяснения. [\[40\]](#)

Итак, отбросив сомнения и усердно следуя математике энтропии и законам физики — концепциям, которые вместе говорят нам, что с подавляющей вероятностью беспорядок будет возрастать как в будущее, так и в прошлое от любого заданного момента времени, — мы по шею погружаемся в зыбучий песок. И хотя это может звучать не слишком приятно, но это очень хорошая вещь по двум причинам. Во-первых, это с определённой показывающей, что недоверие к памяти и записям — нечто, над чем мы интуитивно насмехаемся, — не имеет оснований. Во-вторых, достигнув точки, где все наши аналитические построения оказались на грани обвала, мы понимаем, что *должно* быть что-то критически важное, что осталось за пределами наших рассуждений.

Следовательно, чтобы избежать пучины объяснений, мы спросим себя: какие новые идеи или концепции помимо энтропии и помимо симметрии законов природы относительно обращения времени нам нужны, чтобы вернуть доверие к нашей памяти и нашим записям — нашим ощущениям, что кубик льда при комнатной температуре тает, но не кристаллизуется, что сливки и кофе смешиваются, но не разделяются, что яйца разбиваются, но не восстанавливаются? Короче говоря, куда нас приведёт попытка объяснить асимметричное разворачивание событий в пространстве-времени с энтропией, которая растёт по направлению в будущее, но *уменьшается* по направлению в прошлое? Возможно ли это?

Да, возможно. Но только если имелось весьма специфическое прошлое. [\[79\]](#)

Яйцо, курица и Большой взрыв

Чтобы увидеть, что это означает, выберем в качестве примера изначально низкоэнтропийное, полностью сформированное яйцо. Как возникла такая низкоэнтропийная физическая система? Понятно, что, вернув доверие к нашей памяти и записям, мы все знаем ответ: яйцо появилось из курицы. Также знаем, что курица появляется из яйца, которое появляется из курицы, которая появляется из яйца, и т. д. Но, как

настойчиво подчёркивал английский математик Роджер Пенроуз,^{[180](#)} история куриц и яиц на самом деле учит нас кое-чему глубокому и приводит к некоторой определённости.

Курица или любой живой организм есть физическая система с поразительно высокой упорядоченностью. Откуда возникла такая организация и как она поддерживается? Курица остаётся живой, причём достаточно долго, чтобы произвести яйца, питаясь и дыша. Пища и кислород обеспечивают материалы, из которых живой организм извлекает необходимую энергию. Но имеется критически важное свойство этой энергии, которое необходимо подчеркнуть, если вы действительно хотите понять, что происходит. По ходу своей жизни курица, которая остаётся здоровой, принимает как раз примерно столько энергии в виде пищи, сколько она возвращает в окружающую среду, главным образом в форме тепла и других отходов, генерируемых её метаболическими процессами и ежедневной деятельностью. Если бы не было такого баланса между приходящей и уходящей энергией, курица становилась бы всё больше и больше.

Важный момент состоит в том, что не все формы энергии эквивалентны. Энергия, которую курица отдаёт окружающей среде в форме тепла, в высшей степени неупорядочена — она часто приводит к тому, что некоторые молекулы воздуха, теснящиеся тут и там, сталкиваются более интенсивно, чем если бы этой энергии не было. Такая энергия имеет высокую энтропию — она распылена и перемешана с окружающей средой — и поэтому не может быть легко приспособлена для каких-либо полезных целей. Напротив, энергия, которую курица получает из пищи, имеет низкую энтропию и готова к использованию для поддержания жизни. Так курица и, фактически, любая форма жизни является каналом, собирающим низкоэнтропийную энергию, и выдающим наружу высокоэнтропийную энергию.

Это понимание сдвигает вопрос о том, откуда возникла низкая энтропия яйца, на один шаг назад. Как получается, что источник энергии для курицы, пища, имеет столь низкую энтропию?

Как мы объясним этот аномальный источник порядка? Если пища имеет животное происхождение, мы снова приходим к исходному вопросу: почему животные имеют такую низкую энтропию? Но если мы проследуем по пищевой цепочке, мы в конечном счёте придём к животным (вроде меня), которые едят только растения. Как растения и производимые ими продукты в виде фруктов, овощей и зелени поддерживают низкую энтропию? С помощью фотосинтеза растения используют солнечный свет,

чтобы разделить углекислый газ на кислород, который возвращается назад в окружающую среду, и углерод, который растения используют, чтобы расти и цвести. Так мы можем проследить за низкоэнтропийными источниками энергии неживотного происхождения вплоть до Солнца.

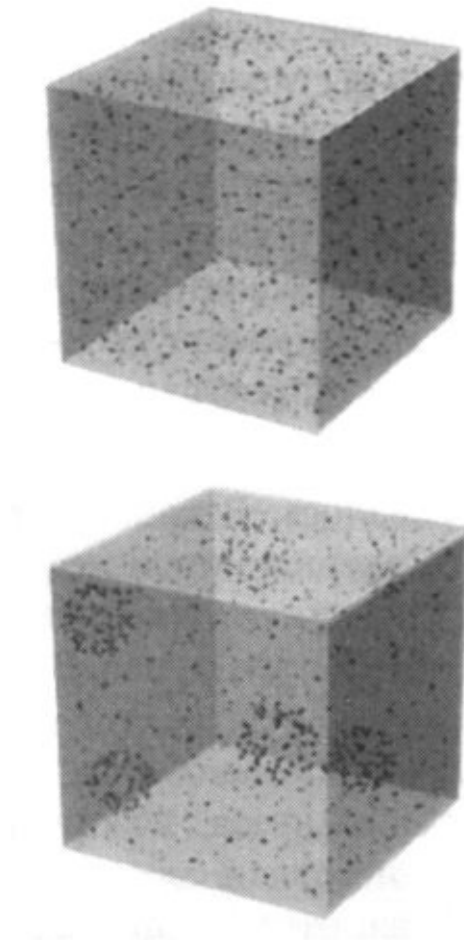
Это отодвигает вопрос объяснения низкой энтропии ещё на шаг назад: откуда взялось наше высокоупорядоченное Солнце? Солнце сформировалось около 5 млрд лет назад из первичного рассеянного облака газа, которое начало вращаться и сгущаться под воздействием взаимного гравитационного притяжения всех его составляющих частей. По мере того как газовое облако становилось плотнее, гравитационное притяжение между частями становилось сильнее, заставляя облако всё больше коллапсировать в себя. И по мере того как гравитация сжимала облако всё сильнее, оно разогревалось. В конечном счёте оно разогрелось достаточно, чтобы начались ядерные процессы, которые сгенерировали выходящее наружу излучение, достаточное для того, чтобы помешать дальнейшему гравитационному сжатию газа. Родилась горячая, стабильная, ярко сияющая звезда.

Тогда откуда возникло рассеянное облако газа? Вероятно, оно сформировалось из остатков старых звёзд, которые достигли конца своей жизни, став сверхновыми, и исторгли своё содержимое в пространство. Откуда взялся рассеянный газ, отвечающий за появление этих ранних звёзд? Мы думаем, что газ сформировался как следствие Большого взрыва. Наши наиболее разработанные теории возникновения Вселенной — наши самые разработанные *космологические* теории — говорят, что в момент, когда Вселенная была пару минут отроду, она была заполнена *почти однородным горячим газом*, состоящим примерно на 75% из водорода, на 23% из гелия и из небольшого количества дейтерия и лития. Существенным моментом является то, что этот газ, заполняя Вселенную, имел крайне *низкую* энтропию. Большой взрыв дал старт Вселенной в состоянии низкой энтропии, и это состояние явилось источником упорядоченности, которую мы видим в настоящее время. Иными словами, текущий порядок является *космологическим реликтом*. Теперь рассмотрим это важное объяснение немного более детально.

Энтропия и гравитация

Поскольку теория и наблюдения показывают, что в течение нескольких минут после Большого взрыва изначальный газ был однородно распределён

по юной Вселенной, вы можете подумать, обратившись к нашей ранней дискуссии о бутылке колы и её молекулах углекислого газа, что изначальный газ был в высокоэнтропийном, неупорядоченном состоянии. Но, оказывается, это неверно. Наша прежнее обсуждение энтропии, полностью игнорирующее гравитацию, имело смысл, поскольку гравитация почти не играет роли в поведении минимального количества газа, выходящего из бутылки колы. И в этом предположении мы выяснили, что однородно распределённый газ имеет высокую энтропию. Но когда гравитация имеет значение, всё становится по-другому. Гравитация есть универсальная сила притяжения; поэтому, если вы имеете достаточно большую массу газа, каждая область газа будет притягиваться к каждой другой, и это заставит газ распасться на сгустки, что напоминает фрагментацию воды на капли на листе вощёной бумаги, вызываемую поверхностным натяжением. Когда гравитация имеет значение, как это было в высокоплотной ранней Вселенной, нормой является скопление в кучу, а не однородность; это и есть состояние, в направлении которого газ будет стремиться эволюционировать, как показано на рис. 6.5.



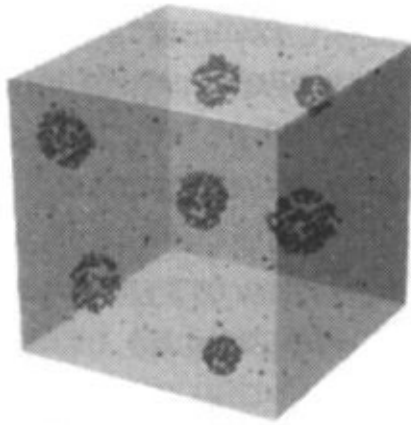


Рис. 6.5. Для гигантских объёмов газа, когда гравитация имеет существенное значение, атомы и молекулы эволюционируют из однородной равномерно распределённой конфигурации в конфигурацию, включающую всё большие и более плотные сгущения

Хотя сгущения являются более упорядоченными, чем исходный рассеянный газ, — примерно как игровая комната с игрушками, которые аккуратно разложены по шкафам и ящикам, более упорядочена, чем комната, в которой игрушки разбросаны по полу, — в расчёте энтропии надо рассчитывать вклад от всех источников. Для игровой комнаты уменьшение энтропии в процессе перехода от беспорядочно разбросанных игрушек к игрушкам, разложенным по шкафам и ящикам, более чем компенсируется ростом энтропии от сгорающих жиров и выделяемого тепла телами родителей, которые потратили часы, чтобы всё вычистить и привести в порядок. Аналогично, в первичном рассеянном газовом облаке вы обнаружите, что уменьшение энтропии при формировании упорядоченных сгустков более чем компенсируется за счёт выделения тепла при сжатии газа и, в конце концов, за счёт огромного количества тепла и света, высвобождающегося при возникновении ядерных процессов.

Это важный момент, который временами упускается из вида. Подавляющее стремление в направлении беспорядка не означает, что не могут формироваться организованные структуры, вроде звёзд и планет, или организованные формы жизни, вроде растений и животных. Конечно, могут. И, очевидно, формируются. Что определяет второй закон термодинамики, так это то, что при формировании порядка всегда имеется более чем компенсирующий генератор беспорядка. Итог энтропийного

баланса всё равно находится в плюсе, энтропия растёт, хотя определённые составляющие системы становятся более упорядоченными. И из фундаментальных сил природы гравитация — единственная, которая использует это свойство энтропии во всей полноте. Поскольку гравитация действует через громадные расстояния и является универсально притягивающей силой, она подстёгивает формирование упорядоченных сгустков газа — звёзд, испускающих свет, который мы видим на чистом ночном небе, в полном соответствии с итоговым балансом в пользу роста энтропии.

Чем более сжаты, плотны и массивны сгущения газа, тем больше общая энтропия. Чёрные дыры — наиболее экстремальная форма гравитационного сгущения и сжатия во Вселенной, дошедшая до предела. Гравитационное притяжение чёрной дыры настолько сильно, что ничто, даже свет, не может вырваться, что объясняет, почему чёрные дыры являются чёрными. Поэтому, в отличие от обычных звёзд, чёрные дыры упрямо удерживают всю энтропию, которую они произвели: ничто не может вырваться из мощнейшей гравитационной хватки чёрной дыры.^[81] Фактически, как мы будем обсуждать в главе 16, ничто во Вселенной не содержит больше беспорядка (больше энтропии), чем чёрная дыра.^[41] Это имеет простое интуитивное объяснение: высокая энтропия означает, что огромное количество перестановок составляющих частей объекта останутся незамеченными. Поскольку мы не можем видеть внутренность чёрной дыры, невозможно отследить любую перегруппировку её составляющих, какими бы ни были эти составляющие, и поэтому чёрная дыра имеет максимальную энтропию. Когда гравитация напрягает свои мускулы до предела, она становится самым эффективным генератором энтропии в известной Вселенной.

Теперь добрались до последней инстанции. *Исходным источником порядка, низкой энтропии, должен быть сам Большой взрыв.* На своей самой ранней стадии, вместо того чтобы быть заполненной чудовищными контейнерами энтропии, вроде чёрных дыр, как мы могли бы ожидать на основе вероятностного рассмотрения, по некоторым причинам рождающаяся Вселенная была заполнена горячей и однородной газовой смесью водорода и гелия. Хотя при плотностях настолько низких, что можно игнорировать гравитацию, такая конфигурация имела бы высокую энтропию, ситуация становится совершенно иной, когда гравитацией нельзя пренебречь; тогда однородный газ имеет крайне низкую энтропию. По сравнению с чёрными дырами, рассеянный, почти однородный газ

пребывал в состоянии с крайне низкой энтропией. С тех пор, в соответствии со вторым законом термодинамики, общая энтропия Вселенной постоянно растёт; постепенно возрастает общее итоговое количество беспорядка. Спустя примерно миллиард лет или около того после Большого взрыва гравитация заставила изначальный газ собраться в сгущения, и эти сгустки, в конце концов, сформировали звёзды, галактики и некоторые более мелкие сгущения, которые стали планетами. По меньшей мере у одной такой планеты была рядом звезда, обеспечивающая относительно низкоэнтропийный источник энергии, который позволил развиваться низкоэнтропийным формам жизни. Среди таких форм жизни со временем возникла курица, которая отложила яйцо, которое нашло свой путь к вашему кухонному столу и, к вашему огорчению, это яйцо продолжило неотвратимую траекторию к состоянию с более высокой энтропией, скатившись со стола и разбившись об пол. Яйцо разбивается скорее, чем восстанавливается, поскольку это отражает стремление вперёд к более высокой энтропии, которое было инициировано состоянием с необычайно низкой энтропией, с которого началась Вселенная. Невероятный порядок в начале — это то, с чего всё началось, и мы живём в процессе последовательного перехода ко всё большему беспорядку.

В этом состоит та самая ошеломляющая связь, которую мы пытались найти на протяжении всей этой главы. *Разбивающееся яйцо говорит нам нечто глубокое о Большом взрыве.* Оно говорит нам, что Большой взрыв дал начало необычайно упорядоченному рождающемуся космосу.

Та же идея применима ко всем другим примерам. Причина, по которой вновь подбрасываемые в воздух нескреплённые страницы романа «*Война и мир*» приходят в состояние с более высокой энтропией, в том, что они *начинали* с высокоупорядоченной низкоэнтропийной формы. Начальная упорядоченная форма пачки страниц подготовила их к росту энтропии. Наоборот, если страницы изначальны были совершенно вне числового порядка, подбрасывание их в воздух вряд ли изменит энтропию. Так что вопрос снова состоит в том, как они стали с самого начала такими упорядоченными? Ясно, что Толстой написал и представил их в таком порядке, а наборщик текста и переплётчик следовали его инструкциям. А высокоупорядоченные тело и ум Толстого, а также и издателей книги, которые позволили им, каждому в свою очередь, создать том такого высокого порядка, могут быть объяснены, следуя той же цепочке рассуждений, которую мы уже прошли для яйца, которая снова приведёт нас назад к Большому взрыву. А как насчёт наполовину растаявших кубиков льда, которые вы видели в 10:30 вечера? Теперь, раз уж мы

доверяем памяти и записям, вы вспомните, что ещё до 10:00 вечера бармен кинул сформированные кубики льда в ваш стакан. Он взял кубики льда из морозильника, который был разработан умелым инженером и изготовлен талантливым механиком, которые способны создавать нечто такого высокого порядка потому, что они сами являются высоко организованными формами жизни. И снова мы последовательно сводим их высокую организацию к высокоупорядоченному началу Вселенной.

Важное утверждение

Откровение, к которому мы пришли, заключается в том, что мы можем доверять нашей памяти о прошлом с более низкой, а не более высокой энтропией, только если Большой взрыв — процесс, событие или явление, которое привело Вселенную к существованию, — дал старт Вселенной в очень специфическом, высокоупорядоченном состоянии с низкой энтропией. Без этого важного добавления наши ранние рассуждения, что энтропия должна расти как в будущее, так и в прошлое от любого заданного момента, приводят к заключению, что весь порядок, который мы видим, возник из случайной флуктуации обыкновенного неупорядоченного состояния высокой энтропии, а это заключение, как мы уже видели, подрывает сами рассуждения, на которых оно основано. Но, включая в наш анализ маловероятную низкоэнтропийную начальную точку Вселенной, мы теперь видим, что правильное заключение состоит в том, что энтропия растёт по направлению в будущее, поскольку вероятностные рассуждения полностью и без ограничений работают в этом направлении; но энтропия не растёт в прошлое, поскольку *такое* использование вероятностного обоснования находится в противоречии с нашим новым пониманием, что Вселенная начиналась с состояния с очень низкой, а не высокой, энтропией.^[82] Так что условия рождения Вселенной оказываются решающими для направления стрелы времени. *Направление в будущее есть в действительности направление возрастания энтропии. Стрела времени — факт, что события начинаются так и заканчиваются эдак, но никогда не начинаются эдак и заканчиваются так, — начинает свой полёт из высокоупорядоченного, низкоэнтропийного состояния Вселенной в её начале.*^[83]

Последняя загадка

То, что ранняя Вселенная задаёт направление стреле времени, является чудесным заключением, вызывающим глубокое удовлетворение, но мы ещё не закончили. Одна огромная загадка осталась. Как получилось, что Вселенная началась с такой высокоупорядоченной конфигурации, что она организовала вещи так, что на протяжении миллиардов лет, через конфигурации с постоянно уменьшающимся порядком, всё эволюционировало в направлении к более и более высокой энтропии? Заметьте, насколько это поразительно. Как мы отмечали, с точки зрения вероятности намного более естественным было бы, что частично растаявшие кубики льда, которые вы видели в 10:30 вечера, стали такими в результате статистической флуктуации, возникшей в стакане жидкой воды, а не начались с ещё менее вероятного состояния полностью сформированных кубиков льда. А что верно для кубиков льда, то в несметное количество раз ещё более верно для целой Вселенной. Говоря на языке вероятности, в захватывающей дух степени более вероятно, что всё, что мы сейчас видим во Вселенной, возникло из редкого статистического отклонения от полного беспорядка, а не медленно эволюционировало из ещё более маловероятной, неправдоподобно более упорядоченной, поразительно низкоэнтропийной стартовой точки, которую требует Большой взрыв. [{84}](#)

И ещё, когда мы разбирались со случайностями и представляли, что всё скачком возникло за счёт статистической флуктуации, мы оказались в затруднительном положении: такой подход ставит под сомнение сами законы физики. Так мы решили не полагаться на случайность и пришли к низкоэнтропийному Большому взрыву как к объяснению стрелы времени. Теперь загадка состоит в том, как объяснить, почему Вселенная началась с такой маловероятной, высокоупорядоченной конфигурации. *Это* и есть тот вопрос, на который указывает стрела времени. Всё это приводит к космологии. [{85}](#)

Мы будем заниматься детальным обсуждением космологии в главах с 8 по 11, но сначала отметим, что в нашем обсуждении времени имеется серьёзный недостаток: всё, что мы говорили, основывалось исключительно на классической физике. Теперь рассмотрим, как квантовая механика влияет на понимание времени и на наши поиски его стрелы.

Глава 7. Время и кванты

Как царство квантов помогает понять суть времени

Когда мы думаем о чём-то, подобном времени, о чём-то, внутри чего мы находимся, о чём-то, что полностью входит в наше повседневное существование, о чём-то настолько всепроникающем, что невозможно изъять — даже на мгновение — из общепринятого языка, то наши рассуждения формируются под определяющим влиянием наших ощущений. Эти повседневные ощущения являются классическими; с высокой степенью точности они соответствуют законам физики, установленным Ньютоном более чем три столетия назад. Но из всех открытий в физике за последнюю сотню лет квантовая механика является самым поразительным, поскольку она подрывает всю концептуальную схему классической физики.

Так что стоит расширить наши классические представления и рассмотреть некоторые эксперименты, которые обнаруживают удивительные особенности того, как разворачиваются во времени квантовые процессы. Мы продолжим обсуждать темы предыдущей главы в этом более широком контексте и зададимся вопросом, имеется ли стрела времени в квантово-механическом описании природы. Мы получим ответ, который вызывает споры даже среди физиков. И он снова вернёт нас к вопросу о происхождении Вселенной.

Прошлое согласно квантовой теории

В предыдущей главе вероятность играла центральную роль, однако я несколько раз акцентировал внимание на том, что она возникает только вследствие практического удобства и полезности предоставляемой ею информации. Отслеживание точного движения 10^{24} молекул H_2O в стакане воды выходит далеко за рамки наших вычислительных возможностей, и, даже если бы это было возможно, что мы стали бы делать с итоговой горой данных? Определить по списку, содержащему 10^{24} положений и скоростей, присутствовали ли кубики льда в стакане, — это непомерно сложная задача. Так что вместо этого мы обращаемся к вероятностным рассуждениям, доступным для вычислений и, более того, имеющим дело с

макроскопическими свойствами (порядок против беспорядка; например, лёд против воды), которыми мы обычно и интересуемся. Но имейте в виду, при этом не подразумевается, что вероятность фундаментально вшита в ткань классической физики. В принципе, если бы мы точно знали, как вещи ведут себя в настоящий момент, — знали бы положения и скорости каждой отдельной частицы, составляющей Вселенную, — то классическая физика говорит, что мы могли бы использовать эту информацию для предсказания, как вещи будут себя вести в любой заданный момент в будущем или как они себя вели в любой заданный момент в прошлом. Будете вы на самом деле следить за их развитием момент за моментом или нет, но в соответствии с классической физикой вы можете говорить о прошлом и будущем, в принципе, с уверенностью, которая определяется скрупулёзностью и точностью ваших наблюдений настоящего момента.^[86]

В этой главе вероятность также будет играть центральную роль. Но, поскольку вероятность является неизбежным элементом квантовой механики, это фундаментально меняет наше представление о прошлом и будущем. Мы уже видели, что квантовая неопределённость не допускает одновременного знания точных положений и точных скоростей. Мы также видели, что квантовая физика предсказывает только вероятность реализации того или иного будущего. Мы уверены в этих вероятностях, но, поскольку это всё же вероятности, ясно, что имеется *неизбежный* элемент случайности при попытке предсказать будущее.

Когда приходится описывать прошлое, между классической и квантовой физикой также имеется важное отличие. В классической физике, в связи с её равноправным рассмотрением всех моментов времени, события, приводящие к чему-нибудь, что мы наблюдаем, описываются с использованием в точности того же языка, с применением в точности тех же характерных свойств, которые мы используем для описания самого наблюдения. Если мы видим огненный метеор в ночном небе, мы говорим о его положении и скорости; если мы воссоздаём картину его появления там, мы также говорим об однозначной последовательности положений и скоростей, когда метеор нёсся через пространство к Земле. В квантовой физике, когда мы что-то наблюдаем, мы входим в особое царство, где что-то может быть известно со 100%-й определённостью (игнорируя проблемы, связанные с точностью приборов, и подобные им). Но прошлое — под которым мы конкретно понимаем «ненаблюдаемое» прошлое, т. е. время перед тем, как мы, или кто-нибудь, или что-нибудь проводит данное наблюдение, — остаётся в обычном царстве квантовой неопределённости, в царстве вероятностей. Даже если мы прямо здесь и прямо сейчас

зафиксировали положение электрона, то моментом раньше всё, что он имел, — это вероятность быть здесь, или там, или вообще где-то далеко.

Как мы видели, это не значит, что электрон (или любая частица) на самом деле находился только в одном из этих возможных положений, но мы просто не знаем, в каком.^[87] Скорее, есть основания полагать, что электрон был во всех положениях, поскольку каждая из вероятностей — каждая из возможных историй — вносит вклад в то, что мы наблюдаем в настоящий момент. Вспомним, это доказывалось экспериментом, описанном в главе 4, в котором электроны пролетали через две щели. Классическая физика, которая опирается на широко разделяемое убеждение, что события имеют однозначные истории, говорит, что каждый электрон, попавший на экран детектора, прошёл либо через левую щель, либо через правую щель. Но такое представление о прошлом вводит в заблуждение: оно предсказывает результаты, показанные на рис. 4.3а, которые не согласуются с тем, что происходит на самом деле (что показано на рис. 4.3б). Наблюдаемая интерференционная картина может быть объяснена только чем-то, проходящим через обе щели.

Квантовая физика обеспечивает именно такое объяснение, но при этом радикально меняет наши взгляды на прошлое — наше описание того, как отдельные события, которые мы наблюдаем, стали такими, какие есть. В соответствии с квантовой механикой вероятностная волна каждого электрона проходит через обе щели, и, поскольку части волны, выходящие из каждой щели, смешиваются, итоговое распределение вероятности и, следовательно, места попадания электронов на экран демонстрируют интерференционную картину.

По сравнению с повседневным опытом, описание прошлого электрона в терминах накладывающихся волн вероятности совершенно необычно. Но, отбросив осторожность, вы можете предложить продвинуть это квантово-механическое описание ещё на один шаг дальше, что приведёт к ещё более причудливой возможности. Может быть, каждый отдельный электрон сам по себе на пути к экрану действительно проходит через обе щели, и итоговая картина является результатом интерференции этих двух классов историй. То есть имеется соблазн думать о волнах, выходящих из двух щелей, как о представляющих две возможные истории для индивидуального электрона — проходящего через левую щель или проходящего через правую щель, — и поскольку обе волны вносят вклад в то, что мы наблюдаем на экране, возможно, квантовая механика говорит нам, что обе потенциальные истории электрона вносят вклад в результат.

Удивительно, эта странная и чудесная идея — дитя разума

нобелевского лауреата Ричарда Фейнмана, одного из самых оригинальных физиков XX в., — открывает весьма жизнеспособный путь размышлений о квантовой механике. Согласно Фейнману, если имеются альтернативные пути, по которым может быть достигнут заданный результат, — например, электрон попадает в некоторую точку на экране детектора, пролетев через левую щель, или попадает в ту же точку, но пролетев через правую щель, — тогда, в некотором смысле, все альтернативные варианты событий имеют место и происходят одновременно. Фейнман показал, что каждая такая история будет вносить вклад в вероятность того, что будет реализован их общий результат, и если эти вклады аккуратно сложить друг с другом, результат будет совпадать с полной вероятностью, которую предсказывает квантовая механика.

Фейнман назвал этот подход к квантовой механике *суммированием по историям*^[42]; этот подход показывает, что вероятностная волна объединяет все возможные варианты прошлого, которые могли предшествовать данному наблюдению, и хорошо иллюстрирует, что, для того чтобы достичь успеха там, где классическая физика терпит неудачу, квантовой механике приходится существенно расширять горизонты истории.^[88]

В страну Оз

Существует другой вариант эксперимента с двойной щелью, в котором интерференция между альтернативными историями становится ещё более явной, поскольку два пути к экрану детектора разделены сильнее. Немного проще описывать эксперимент, используя фотоны вместо электронов, так что мы начинаем с источника фотонов — лазера — и выпускаем из него луч в направлении так называемого *светоделиителя*. Этот прибор выполнен из полупрозрачного зеркала, типа такого, какие используются для скрытого наблюдения. Такое зеркало отражает половину падающего на него света, а другая половина проходит насквозь. Таким образом, исходный одиночный луч света расщепляется на два, левый и правый лучи, аналогично тому, что происходит с лучом света, который сталкивается с двумя щелями в двухщелевом опыте. Используя полностью отражающие зеркала, расположенные как показано на рис. 7.1, два луча снова собираются вместе и далее направляются к детектору. Рассматривая свет в виде волны, как в описании Максвелла, мы ожидаем увидеть — и, несомненно, видим — на экране интерференционную картину. Длина пути немного отличается для левого и правого маршрута, так что в то время как левый луч может

достичь пика в заданной точке экрана детектора, правый луч может достичь пика, впадины или некоторого промежуточного состояния. Детектор записывает сумму интенсивностей двух волн, и поэтому мы получаем характерную интерференционную картину.

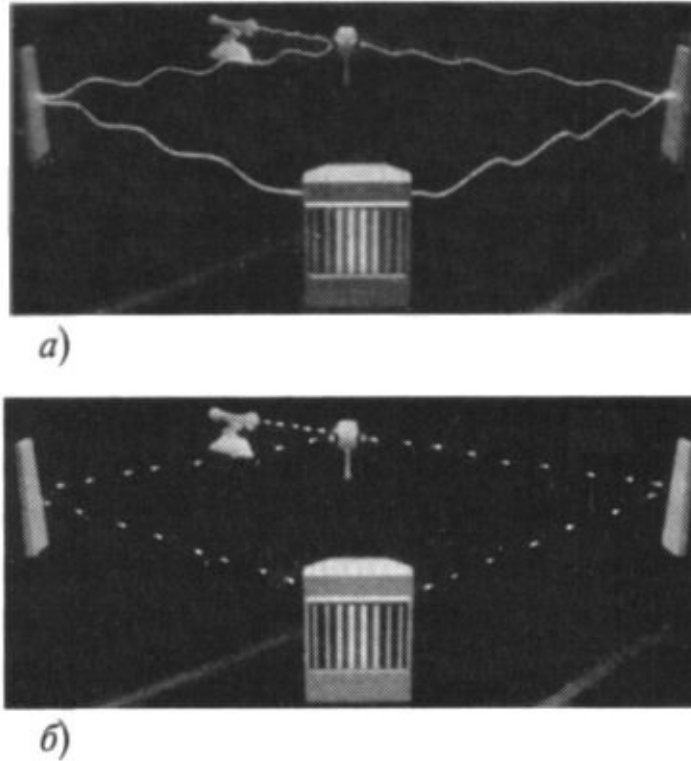


Рис. 7.1. (а) В эксперименте со светоделителем лазерный свет разделяется на два луча, которые идут двумя раздельными путями к экрану детектора. (б) Интенсивность излучения лазера может быть снижена настолько, что он будет испускать отдельные фотоны; фотоны попадают на экран, со временем выстраивая интерференционную картину

Различие между классическим и квантовым станет очевидным, если мы значительно понизим интенсивность пучка лазера, так что он станет испускать одиночные фотоны, скажем, один в несколько секунд. Когда отдельный фотон попадает в светоделитель, классическая интуиция говорит, что он либо пройдёт насквозь, либо будет отражён. Классические рассуждения не допускают даже намёка на интерференцию, поскольку тут нечему интерферировать: всё, что мы имеем, это отдельные фотоны, проходящие от источника к детектору, один за другим, некоторые по левому пути, некоторые по правому. Но когда эксперимент завершён, то

отдельные фотоны, регистрируемые всё это время (примерно как на рис. 4.4), *дают* интерференционную картину, как на рис. 7.1б. В соответствии с квантовой физикой причина этого состоит в том, что каждый зарегистрированный детектором фотон может дойти до детектора, двигаясь либо по левому пути, либо по правому. Так что мы обязаны объединить эти две возможные истории при определении вероятности того, что фотон попадёт на экран в ту или иную точку. Когда левая и правая вероятностные волны для каждого индивидуального фотона объединяются, они дают волнообразную вероятностную картину интерференции волн. Так что в отличие от Дороти, которая была сбита с толку, когда Страшила указал сразу налево и направо, показывая ей направление в страну Оз, результаты эксперимента с расщеплением пучка фотонов можно объяснить тем, что каждый фотон, направляясь к детектору, идёт сразу и левым, и правым путём.

Свобода выбора

Хотя мы описали объединение возможных историй только на двух специальных примерах, такой ход размышлений о квантовой механике является общим. В то время как классическая физика описывает настоящее как имеющее единственное прошлое, вероятностные волны квантовой механики расширяют арену истории: в формулировке Фейнмана наблюдаемое настоящее представляет смесь — особый вид *усреднения* — всех возможных прошлых, совместимых с тем, что мы сейчас наблюдаем.

В случае экспериментов с двумя щелями и светоделителем электрон или фотон имеют два пути от источника до экрана детектора — налево или направо — и только при комбинировании возможных историй мы приходим к объяснению того, что наблюдаем. Если барьер имеет три щели, мы должны принять во внимание три вида событий; с 300 щелями нам необходимо учитывать всё множество возможных результирующих событий. В крайнем случае, если мы представим, что прорезано гигантское количество щелей, — фактически так много, что барьер исчезает, — квантовая физика говорит, что каждый электрон будет двигаться по любой возможной траектории к выделенной точке на экране, и только объединяя вероятности, связанные с каждой такой историей, мы можем объяснить итоговые данные. Это может звучать странно. (Это и есть странно.) Но такое причудливое рассмотрение прошедшего времени объясняет данные на рис. 4.4, 7.1б и любой другой эксперимент, проводимый с микромиром.

Насколько буквально нужно принимать описание через сумму по историям? Электрон, который попадает на экран детектора, *действительно* проходит вдоль всех возможных путей, или рецепт Фейнмана есть просто хитрая математическая выдумка, дающая правильный ответ? Этот вопрос находится среди ключевых для оценки истинной природы квантовой реальности, так что я хотел бы дать вам определённый ответ. Но не могу. Физики считают такой подход очень удобным для представления огромного числа объединяемых историй; я использую его в собственных исследованиях настолько часто, что он ощущается реальным. Но мы не говорим, что это *действительно* реально. Суть в том, что квантовые вычисления дают нам вероятность попадания электрона в ту или иную точку экрана, и эти предсказания согласуются с данными опыта, с пятнами на экране. Поскольку речь идёт о проверке теории и её предсказательной силы, не так уж существенно, как именно электрон достигает данной точки на экране.

Но, продолжаете настаивать вы, мы можем выяснить, что же происходит на самом деле, изменив экспериментальные условия так, чтобы мы смогли теперь наблюдать и предполагаемую размытую смесь возможных прошлых, вливающих в наблюдаемое настоящее. Это хорошее предложение, но нам уже известно, что имеется препятствие. В главе 4 мы узнали, что волны вероятности непосредственно ненаблюдаемы; а поскольку объединяющиеся истории Фейнмана есть ничто иное, как особый способ размышлений о вероятностных волнах, они тоже должны ускользать от прямых наблюдений. И они ускользают. Наблюдения не могут выхватить отдельные индивидуальные истории; скорее наблюдения отражают *среднее* по всем возможным историям. Поэтому если вы измените условия опыта так, чтобы наблюдать электроны в полёте, то обнаружите, что каждый электрон проходит через ваш дополнительный детектор в том или ином месте; но вы никогда не увидите какую-то размытую множественную историю. Когда вы используете квантовую механику для объяснения, *почему* вы видели электрон в том или ином месте, ответ будет включать усреднение по всем возможным историям, которые могут привести к этому промежуточному наблюдению. Но само наблюдение имеет доступ только к историям, которые уже соединены. Наблюдая за электроном в полёте, вы просто сдвигаете назад обозначение того, что вы считаете историей. Квантовая механика жёстко операциональна: она объясняет, что вы видите, но не позволяет вам видеть объяснение.

Вы можете спросить далее: почему тогда классическая физика —

физика здравого смысла, — которая описывает движение в терминах единственной истории и траектории, вообще имеет отношение к Вселенной? Почему она так хорошо работает в объяснениях и предсказаниях движения чего угодно, от бейсбольного мяча до планет и комет? Почему в каждодневной жизни нет подтверждений того странного пути, по которому прошлое, по-видимому, разворачивается в настоящее? Причина, уже коротко обсуждавшаяся в главе 4, и которую мы вскоре изучим более подробно, состоит в том, что бейсбольные мячи, планеты и кометы относительно велики, как минимум по сравнению с частицами вроде электрона. А в квантовой механике чем больше что-то, тем более неравноправным становится усреднение: все возможные траектории *дают* вклад в движение бейсбольного мяча в полёте, но обычный путь — один единственный путь, предсказываемый законами Ньютона, — даёт *намного* больший вклад, чем все остальные пути. Для больших объектов классические пути дают в огромной степени больший вклад в процесс усреднения, так что они и являются единственными, к которым мы привыкли. Но когда объекты малы, подобно электронам, кваркам и фотонам, многие различные истории вносят вклад ориентировочно одного порядка, следовательно, все они играют важную роль в процессе усреднения.

Наконец, вы можете спросить: что такого особенного в акте наблюдения или измерения, что он может вынудить все возможные истории соединиться вместе и дать единственный результат? Как акт наблюдения говорит частице, что пора подвести итог историям, усреднить их и зафиксировать определённый итог? Почему люди и сделанное ими оборудование имеют такую особую силу? Особая ли она? Или, может быть, акт наблюдения является специальным случаем некоторого более общего влияния внешней среды, и мы, квантово-механически говоря, не такие уж особые, в конце концов? Мы будем обсуждать эти трудные и спорные вопросы во второй половине этой главы, поскольку они не только являются центральными для понимания природы квантовой реальности, но они дают хорошую основу для размышлений о квантовой механике и стреле времени.

Вычисление квантово-механических средних требует хорошей технической подготовки. Полное понимание того, как, когда и где подсчитываются средние, требует концепций, над формулировками которых физики интенсивно работают до сих пор. Но один ключевой урок может быть извлечён легко: квантовая механика представляет собой арену предельно свободного выбора: каждый возможный «выбор», который

может быть сделан при переходе объекта отсюда туда, включён в квантово-механическую вероятность, связанную с соответствующим переходом.

Классическая и квантовая физика трактуют прошлое очень по-разному.

Усечение истории

С нашим классическим восприятием чрезвычайно трудно представить один неделимый объект — электрон или фотон — одновременнодвигающимся вдоль более чем одного пути. Даже те из нас, кто имеет высочайший самоконтроль, с трудом бы справились с соблазном взглянуть украдкой: по какой траектории *на самом деле* следует по пути к детектору электрон или фотон, проходя через экран с двойной щелью или светоделитель. Почему не установить маленькие детекторы перед каждой щелью в эксперименте с двумя щелями, чтобы сказать точно, пролетает электрон через одно отверстие, через другое или через оба (в то же время оставляя электрону возможность проследовать в направлении главного детектора)? В эксперименте со светоделителем почему не поставить на каждом пути от светоделителя маленький детектор, который определит, какой путь выбрал фотон, левый, правый или оба (опять-таки, позволяя фотону сохранить движение к детектору)?

Ответ таков — вы *можете* ввести эти дополнительные детекторы, но если вы это сделаете, вы обнаружите два обстоятельства. Первое: каждый электрон и каждый фотон всегда будут обнаружены только одним из детекторов; так что вы можете определить, по какому пути следует каждый электрон или фотон, и вы увидите, что он всегда двигается по одному или другому пути и никогда по обоим. Второе: итоговые результаты, записанные главным детектором, изменились. Вместо того чтобы получить интерференционную картину, как на рис. 4.3б и 7.1б, вы получите результаты, ожидавшиеся классической физикой, как на рис. 4.3а. Введя новые элементы — новые детекторы, — вы непреднамеренно изменили эксперимент. И изменения таковы, что парадокс, который вы вот-вот готовы были разгадать, — пропал. Теперь вы знаете, какой путь выбрала каждая частица, откуда же взяться интерференции с другим путём, который частица демонстративно не выбрала? Причина следует немедленно из результатов последнего раздела. Ваше новое наблюдение выделило те истории, которые могли предшествовать всему, что бы могло обнаружить ваше новое наблюдение. И поскольку это наблюдение определило, какой путь выбрал фотон, *мы рассматриваем только те истории, которые*

соответствуют прохождению по этому пути, что приводит к уничтожению возможности интерференции.

Нильс Бор обобщил это, используя свой *принцип дополнительности*. Каждый электрон, каждый фотон, всё, что угодно, имеет как свойства частицы, так и волновую природу. Это дополняющие друг друга свойства. Размышление только в рамках концепции обычной частицы — в которых частица движется вдоль одной-единственной траектории — неполно, поскольку оно отбрасывает волновые свойства, демонстрируемые интерференционными эффектами.^[43] Размышление только в волновых рамках неполно, поскольку оно отбрасывает корпускулярные стороны явления, демонстрируемые измерениями, в которых обнаруживаются локализованные частицы, что может быть зафиксировано, например, в виде отдельной точки на экране (см. рис. 4.4). Для воссоздания полной картины явления необходимо принимать во внимание обе взаимодополнительные стороны. В любой данной ситуации вы можете сделать одну сторону более заметной, в зависимости от того, какие вы выберете взаимодействия. Если вы позволяете электронам проходить от источника к экрану без наблюдения, могут проявиться их волновые свойства, в результате получится интерференция. Но если вы наблюдаете электрон в пути и вы знаете, какой путь он выбрал, тогда вы будете не в состоянии объяснить интерференцию. Реальность приходит на помощь. Ваше наблюдение отсекает ветви квантовой истории. Оно заставляет электрон вести себя подобно частице; поскольку частицы двигаются тем *или* иным путём, интерференционная картина не формируется, так что нечего и объяснять.

Природа делает фантастические вещи. Она ходит по краю. Но старательно лавирует и уклоняется от фатальных ударов логических парадоксов.

Случайность истории

Эти эксперименты поразительны. Они обеспечивают простое, но мощное доказательство того, что наш мир управляется квантовыми законами, найденными физиками в XX в., а не классическими законами, найденными Ньютоном, Максвеллом и Эйнштейном, — законами, которые мы сегодня признаём как эффективные и успешные для приблизительного описания событий в достаточно больших масштабах. Мы уже видели, что квантовые законы бросают вызов обычным представлениям о том, что происходило в прошлом, — о ненаблюдаемых событиях, которые

ответственны за то, что мы видим в настоящее время. Некоторые простые вариации упомянутых экспериментов выводят наше интуитивное представление о том, как события разворачиваются во времени, на ещё более высокий, ещё более удивительный уровень.

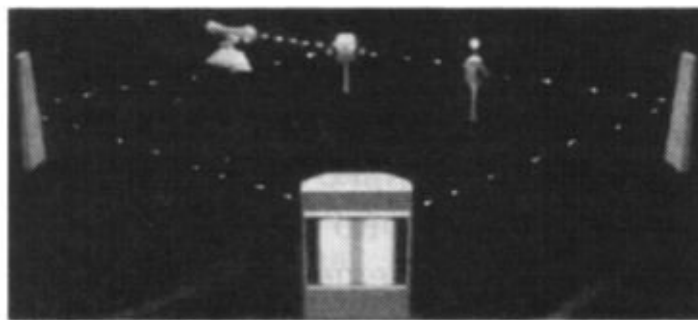
Первый вариант называется экспериментом с *отложенным выбором*, и был предложен в 1980 г. выдающимся физиком Джоном Уилером. Эксперимент неожиданно наталкивает на странно звучащий вопрос: зависит ли прошлое от будущего? Отметим, что это отличается от вопроса, можем ли мы вернуться назад и изменить прошлое (это мы обсудим в главе 15). Эксперимент Уилера, который был проведён и детально проанализирован, вскрывает удивительное переплетение, взаимосвязь между событиями, которые, как мы считаем, имели место в прошлом, даже в удалённом прошлом, и событиями, которые мы рассматриваем как происходящие прямо сейчас.

Чтобы почувствовать физику, представьте, что вы коллекционер произведений искусства, и что мистер Смитерс, председатель нового Общества распространения красоты и искусств Спрингфилда, пришёл взглянуть на различные произведения, которые вы выставили на продажу. Однако вы знаете, что на самом деле его интересует *«Дородный Монти»*, картина в вашей коллекции, которую вы никогда не считали стоящей, но которая является одной из картин, доставшихся вам по завещанию вашего любимого дядюшки Монти Бернса, так что решение продать её требует некоторых эмоциональных усилий. После прихода мистера Смитерса вы беседуете о вашей коллекции, прошедших аукционах, текущем шоу в Метрополитен; и вдруг вы узнаете, что когда-то Смитерс был главным помощником вашего дядюшки. К концу разговора вы решаете, что хотите расстаться с *«Дородным Монти»*: имеется так много произведений, которые вы хотели бы иметь, и вы должны немного ограничивать себя, иначе ваша коллекция станет бесформенной. В отношении коллекционирования произведений искусства вы всегда говорили себе, что иногда качество важнее количества.

Когда вы размышляете об этом решении ретроспективно, кажется, что вы на самом деле уже решились на продажу до прихода мистера Смитерса. Хотя вы всегда имели определённую привязанность к *«Дородному Монти»*, вы долго осторожничали в сборе всё разрастающейся коллекции, а эротически-ядерный реализм конца XX в. является устрашающей областью для любого, даже самого закалённого коллекционера. Хотя вы помните, что перед приходом вашего посетителя вы думали, что не знаете, что делать, но с вашей текущей точки зрения кажется, как если бы вы на самом деле

знали. Не то чтобы будущие события повлияли на прошлые, но ваша совместная встреча с мистером Смитерсом и ваше последующее выражение желания продать картину освещают прошлое так, что возникают определённые мысли, кажущиеся со временем бесспорными. Это как если бы встреча и ваше выражение желания помогли вам признать решение, которое уже было принято и только ожидало своего выхода на сцену. Будущее помогло вам рассказать более полную историю о том, что произошло в прошлом.

Конечно, в этом примере будущие события влияют только на ваше восприятие или интерпретацию прошлого, так что события не являются ни головоломными, ни удивительными. Но эксперимент с отложенным выбором Уилера переносит это психологическое переплетение будущего и прошлого в квантовую область, где оно обретает точный смысл, но не становится от этого менее поразительным. Мы начнём с эксперимента на рис. 7.1а, изменённого путём настройки лазера так, что он испускает отдельный фотон за один раз, как на рис. 7.1б, а также путём присоединения нового детектора фотонов сразу за светоделителем. Если новый детектор выключен (см. рис. 7.2б), мы возвращаемся к исходным настройкам эксперимента и фотоны на фотографическом экране дают интерференционную картину. Но если новый детектор включён (рис. 7.2а), он указывает нам, каким путём движется каждый фотон: если он обнаруживает фотон, значит, фотон выбрал этот путь, если он не обнаруживает фотон, значит, фотон выбрал другой путь. Такая информация о выборе пути, как уже говорилось, вынуждает фотон вести себя подобно частице, так что волновая интерференционная картина больше не создаётся.



a)

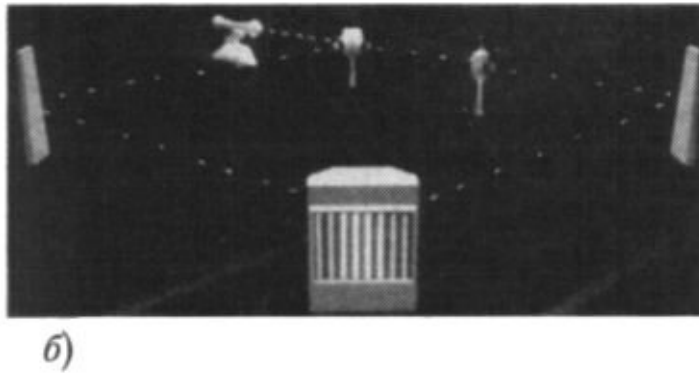


Рис. 7.2. (а) Включая детектор, определяющий выбор пути фотоном, мы разрушаем интерференционную картину. (б) Когда новый детектор выключен, мы возвращаемся к ситуации рис. 7.1 и снова выстраивается интерференционная картина

Теперь, следуя Уилеру, изменим ситуацию, переместив новый детектор фотонов далеко от светоделителя вдоль одного из двух путей. В принципе, путь может быть настолько длинным, насколько вы захотите, так что новый детектор может быть существенно удалён от светоделителя. Снова, если этот новый детектор фотонов выключен, мы находимся в обычной ситуации и фотоны дают на экране интерференционную картину. Если он включён, то обеспечивает информацию о выборе пути и поэтому препятствует возникновению интерференционной картины.

Новые странности возникают из того факта, что измерение выбора пути может быть произведено намного позже того, как фотон в светоделителе «решил», будет ли он вести себя как волна и двигаться по обоим путям или он будет вести себя как частица и двигаться только по одному пути. Когда фотон проходит через светоделитель, он не может «знать», включён новый детектор или нет, — в действительности эксперимент может быть устроен так, что выключатель детектора будет установлен в то или иное положение *после* того, как фотон прошёл через делитель. Чтобы быть готовой к возможности, что детектор выключен, квантовая волна фотона, скорее всего, разделилась и движется по обоим путям, так что смесь обоих путей может дать наблюдаемую интерференционную картину. Но если новый детектор был включён — или если он включается после того, как фотон полностью покинул делитель, — то кажется, что фотон сталкивается с кризисом идентичности: пройдя через делитель, он уже зафиксировал свою волновую природу, двигаясь по обоим путям; но теперь, через некоторое время после осуществления этого

выбора, он «осознаёт», что ему необходимо стать частицей, которая путешествует по одному и только по одному пути.

Однако каким-то образом фотон всегда делает это правильно. Когда бы детектор ни был включён — опять-таки, даже если решение включить его принимается после того, как данный фотон прошёл через светоделитель, — фотон ведёт себя совершенно как частица. Он находится на одном и только на одном пути к экрану (если вы поставили детекторы фотонов на оба пути, каждый эмитированный лазером фотон будет обнаружен одним и только одним детектором, но никогда обоими); итоговые данные не показывают интерференционной картины. Когда бы детектор ни был выключен — даже если это было сделано спустя много времени после того, как фотон прошёл через делитель, — фотоны ведут себя совершенно как волны, создавая замечательную интерференционную картину и показывая, что они шли обоими путями. Это похоже на то, как если бы фотоны приспособляли своё поведение в прошлом к будущему выбору, включён ли новый детектор; как будто фотоны имеют «предчувствие» экспериментальной ситуации, с которой они столкнутся дальше на пути, и ведут себя соответственно. Как будто согласованная и определённая история становится проявленной только после того, как будет полностью фиксировано будущее, к которому оно ведёт.^[89]

Есть нечто схожее с вашими ощущениями от решения о продаже «Дородного Монти». Перед встречей с мистером Смитерсом вы были в двусмысленном, нерешительном, размытом, смешанном состоянии, желая и продать, и не продавать картину. Но совместные разговоры о мире искусства и получение информации о влиянии Смитерса на вашего дядюшку сделали для вас идею о продаже более комфортной. Разговор привёл к твёрдому решению, которое ретроспективно позволило решению выкристаллизироваться из первоначальной неопределённости. Ретроспективно ощущается, будто решимость на самом деле была всегда. Но если бы вы не поговорили так хорошо с мистером Смитерсом, если бы он не придал вам уверенности, что «Дородный Монти» будет в надёжных руках, очень даже вероятно, что вы могли принять решение не продавать картину. А история прошлого, которую вы могли бы рассказать в этом случае, легко могла бы содержать признание, что вы на самом деле очень давно решили не продавать картину, будучи глубоко уверенным, что ваша сентиментальность слишком глубока, чтобы пойти на это. Реальное прошлое, конечно, не изменилось ни на йоту. Однако разные ощущения теперь заставляют вас описывать разную историю.

В области психологии переписывание или реинтерпретация прошлого

является обычным делом;^[44] наша история прошлого часто лишь информирует о наших переживаниях в настоящем. Но в области физики — которую мы обычно рассматриваем как объективную и высеченную в камне дисциплину — зависимость истории от случайностей будущего несколько кружит голову. Чтобы голова закружилась ещё сильнее, Уилер представил космическую версию эксперимента с отложенным выбором, в которой источником света является не лабораторный лазер, а мощный квазар в глубине пространства. Светоделитель представляет собой не лабораторный прибор, а находящуюся на пути света галактику, гравитационное поле которой может действовать подобно линзе, фокусирующей проходящие фотоны и направляющей их к Земле, как на рис. 7.3. Хотя никто на данный момент не проделал указанный эксперимент, в принципе, если собрать достаточно фотонов от квазара, они должны заполнить интерференционную картину на фотопластинке с длительным экспонированием, точно так же, как и в эксперименте с лабораторным светоделителем. Но если в конце одного или другого пути ввести дополнительный детектор фотонов, он обеспечит информацию о выборе пути фотоном, благодаря этому разрушая интерференционную картину.

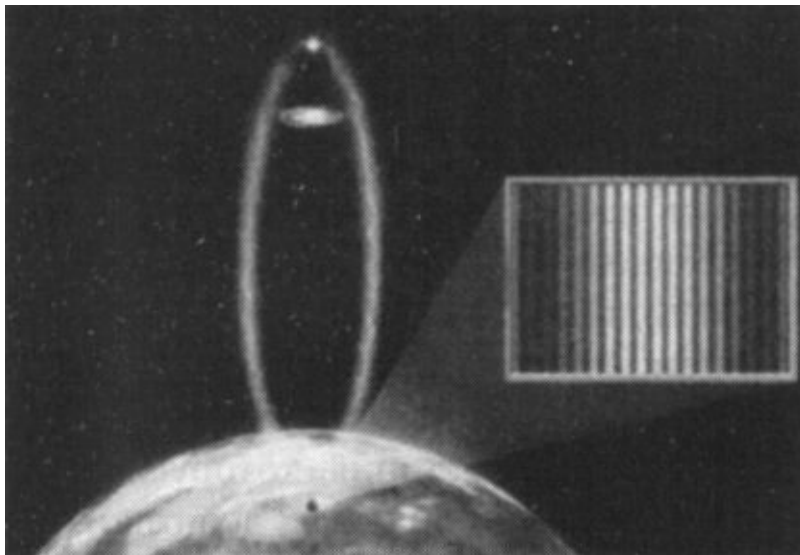


Рис. 7.3. Свет от удалённого квазара, расщеплённый и сфокусированный промежуточной галактикой, в принципе, будет давать интерференционную картину. Если добавочный детектор, который позволяет определить путь для каждого фотона, включён, достигающие Земли фотоны больше не будут давать интерференционную картину

Что поражает в этой версии эксперимента, так это то, что с нашей точки зрения фотоны могли путешествовать многие миллиарды лет. Их решение двигаться вокруг галактики-линзы одним путём, как частица, или обоими путями сразу, как волна, кажется принятым задолго до того, как возник детектор, любой из нас или даже сама Земля. Однако миллиарды лет спустя детектор был построен, установлен на одном из путей фотонов, достигающих Земли, и включён. И эти недавние действия каким-то образом гарантируют, что рассматриваемые фотоны ведут себя как частицы. Это работает так, будто бы они путешествовали к Земле строго вдоль одного или другого пути. Но если через несколько минут мы выключим детектор, то фотоны, которые после этого достигают фотопластины, начинают выстраивать интерференционную картину, свидетельствуя о том, что миллиарды лет назад они путешествовали в тандеме со своим призрачным партнёром одновременно по противоположным путям вокруг галактики.

Включение или выключение детектора в двадцать первом столетии влияет на движение фотонов несколько миллиардов лет назад? Нет, конечно. Квантовая механика не отрицает, что прошлое произошло и произошло окончательно. Недоразумение возникает потому, что концепция *прошлого* в соответствии с квантовой механикой отличается от концепции *прошлого* в соответствии с классической интуицией. Классическое воспитание долго заставляло нас говорить, что данный фотон *поступил* так или *поступил* эдак. Но в квантовом мире, нашем мире, это утверждение, применённое к реальным фотонам, оказывается слишком ограниченным. Как мы видели, в квантовой механике нормой является неопределённая, размытая, смешанная реальность, состоящая из многих нитей, которые кристаллизуются в более обычную, определённую реальность только после проведения подходящего наблюдения. Фотон не решал миллиарды лет назад, пойти ему по одному пути вокруг галактики, или по другому пути, или по обоим путям. Вместо этого на протяжении миллиардов лет он пребывал в том состоянии, которое является нормой в квантовом мире, — в смеси всех возможностей.

Акт наблюдения связывает эту необычную квантовую реальность с повседневным классическим опытом. Наблюдения, которые мы проводим сегодня, вынуждают одну из нитей квантовой истории выделиться в нашем изложении прошлого. В этом смысле, хотя квантовая эволюция от прошлого к настоящему не подвергается влиянию чего-либо, что мы делаем сегодня, история, которую мы называем прошлым, может нести на себе следы сегодняшних действий. Если мы устанавливаем детекторы

фотонов вдоль двух путей, по которым свет следует к экрану, тогда наш рассказ о прошлом будет включать описание того, какой путь выбрал каждый фотон; устанавливая детекторы фотонов, мы обеспечиваем, что информация выбора пути является существенной и определённой частью нашей истории. Но если мы не устанавливаем детекторы фотонов, описание прошлого будет неизбежно другим. Без детекторов фотонов невозможно сказать что-либо о том, каким путём следует фотон; без детекторов фотонов подробности выбора пути фундаментально недоступны. Оба образа действий (с детектированием путей и без) допустимы. Оба интересны. Они просто описывают разные ситуации.

Наблюдение сегодня может, следовательно, помочь завершить историю, которую мы рассказываем о процессе, который начался вчера, позавчера или вообще миллиард лет назад. Сегодняшние наблюдения могут очертить детали, которые мы можем и должны включить в сегодняшнее видение прошлого.

Стирая прошлое

Нужно отметить, что в этих экспериментах прошлое никоим образом не изменяется сегодняшними действиями и что никакая хитрая модификация экспериментов не достигнет этой цели. Тогда возникает вопрос: если вы не можете изменить нечто, что уже произошло, можете ли вы сделать кое-что другое, а именно, стереть *влияние* прошлого на настоящее? В той или иной степени временами такая фантазия может быть реализована. Игрок в бейсбол, который после двух аутов в конце девятого иннинга ^[45] упускает простой мяч, позволяя команде противника завершить розыгрыш очка в одну пробежку, может исправить влияние этой ошибки впечатляющим захватом трудного мяча, посланного следующим отбивающим игроком. И конечно, такой пример ни в малейшей степени не загадочен. Когда событие в прошлом выглядит определённо предотвращающим наступление другого события в будущем (как пропущенный летящий мяч определённо предотвращает безупречную игру), мы могли бы подумать, что здесь что-то не так, только в том случае, если бы нам потом сказали, что предотвращённое событие на самом деле произошло. *Квантовый ластик*, впервые предложенный в 1982 г. Марлен Скалли и Каем Дрюлем, намекает на этот вид странностей в квантовой механике.

Простейшая версия эксперимента с квантовым ластиком использует

двухщелевую установку, модифицированную следующим образом. Прибор, фиксирующий прохождение фотона, располагается перед каждой щелью; он помечает каждый проходящий фотон так, что когда фотон исследуется позже, вы можете сказать, через какую щель он прошёл. Вопрос о том, как вы можете обеспечить маркировку фотона — как вы можете сделать эквивалент нанесения «Л» на фотон, который проходит через левую щель и «П» на фотон, который проходит через правую щель, — хороший вопрос, но детали не особенно важны. Грубо говоря, процесс осуществляется с использованием прибора, который позволяет фотону свободно пройти через щель, но заставляет его спин сориентироваться определённым образом. Если приборы у левой и правой щели ориентируют спины фотонов каждый своим способом, то более совершенный детекторный экран, который не только регистрирует точку в месте попадания фотона, но также и содержит запись об ориентации его спина, будет показывать, через какую щель пролетел данный фотон на своём пути к детектору.

Когда проводится такой двухщелевой эксперимент с маркировкой, фотоны не дают интерференционную картину, как это показано на рис. 7.4а. Теперь уже объяснение должно быть привычным: новый маркирующий прибор позволяет собрать информацию о выборе пути, а информация о выборе пути означает выбор той или иной истории; результаты показывают, что любой данный фотон проходит либо через левую щель, либо через правую щель. А без комбинации левощелевых и правощелевых траекторий нет перекрытия вероятностных волн, так что интерференционная картина не создаётся.

Теперь идея Скалли и Дрюля. Что если сразу после падения фотона на детекторный экран вы уничтожите возможность определения, через какую щель он прошёл, путём разрушения отметки, зафиксированной маркирующим прибором? Без возможности, даже в принципе, выделить информацию о выборе пути из детектируемого фотона, когда оба класса историй опять возвращаются в игру, заставляя снова появляться интерференционную картину. Да, этот вид «отмены» прошлого впечатляет куда больше, чем эффектный захват бейсболиста в конце девятого иннинга. Когда маркирующий прибор включён, фотон послушно ведёт себя как частица, проходя через левую щель *или* через правую щель. Если как-нибудь сразу перед его попаданием в экран мы разрушим метку выбора пути, отмечающую его движение, то кажется, слишком поздно позволять формироваться интерференционной картине. Для интерференции нам надо, чтобы фотон вёл себя как волна. Он должен проходить через обе щели, так чтобы он смог перемешиваться сам с собой на пути к экрану детектора. Но

наша исходная маркировка фотона, кажется, должна гарантировать, что он ведёт себя как частица и проходит либо через левую, либо через правую щель, предотвращая появление интерференционной картины.

В эксперименте, проведённом Раймондом Чиао, Полом Квиатом и Эфраимом Штайнбергом, установка была такой, как схематично показано на рис. 7.4, с новым устройством для стирания, поставленным прямо перед экраном детектора. Опять детали не существенны, но коротко уточним, что ластик работает так, что независимо от того, прошёл ли фотон через левую или через правую щель, его спин указывает на одно и то же фиксированное направление. Последующая проверка его спина, следовательно, не даёт информации о том, через какую щель он прошёл, так что метка выбора пути стёрта. Замечательно, что фотоны, обнаруженные на экране после этого стирания, дают интерференционную картину. Когда ластик установлен прямо перед детекторным экраном, он отменяет — стирает — влияние маркировки фотонов, когда они проходили через щели. Как и в эксперименте с отложенным выбором, в принципе, такой вид стирания мог произойти через миллиарды лет после того влияния, которое он нарушил, фактически отменив прошлое, отменив даже древнее прошлое.

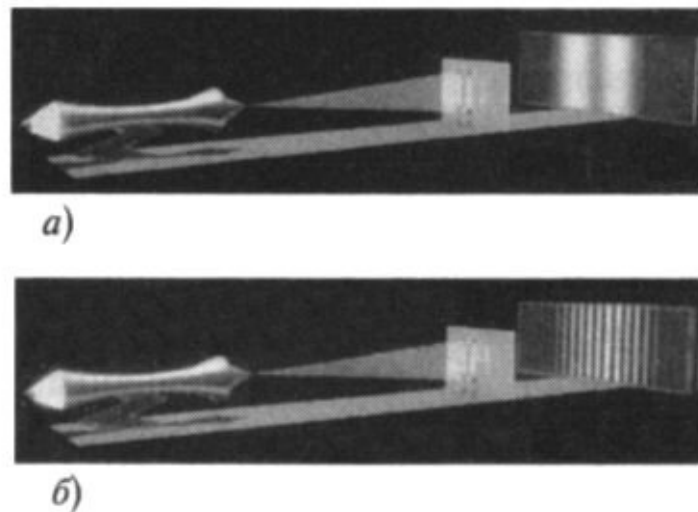


Рис. 7.4. В эксперименте с квантовым ластиком оборудование, располагаемое перед двумя щелями, маркирует фотоны, так что последующее измерение может выявить, через какую щель прошёл каждый фотон. (а) Показано, что эта информация о выборе пути портит интерференционную картину. (б) Сразу перед детекторным экраном ставится прибор, который стирает маркировку фотонов. Поскольку информация о выборе пути уничтожается, снова возникает интерференционная картина

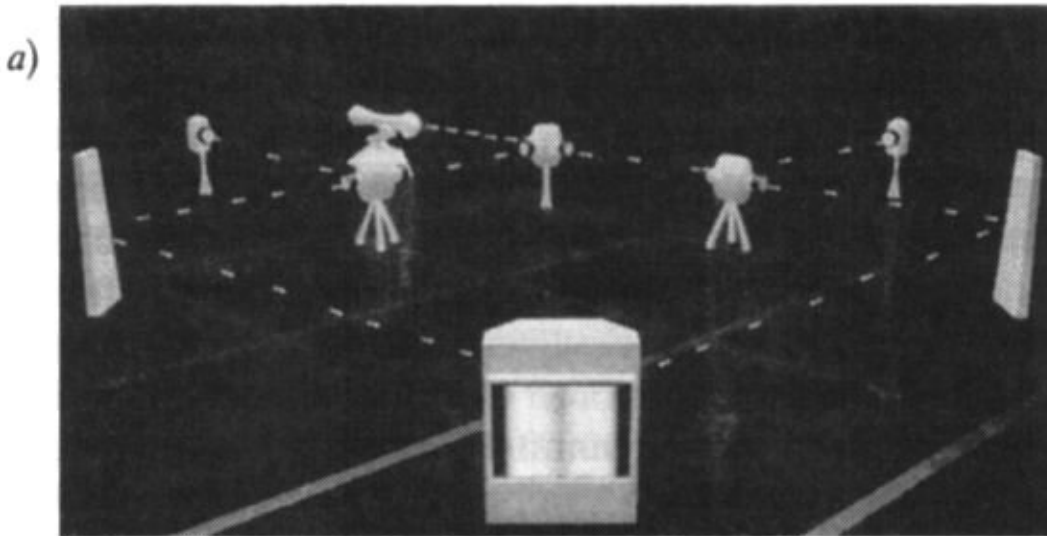
Как можно придать этому смысл? Будем помнить, что результаты полностью согласуются с теоретическими предсказаниями квантовой механики. Скалли и Дрюль предложили этот эксперимент, потому что квантово-механические вычисления убедили их, что это будет работать. Так и произошло. Как и обычно с квантовой механикой, головоломка не противопоставила теорию и эксперимент. Она противопоставила теорию, согласующуюся с экспериментом, нашим интуитивным представлениям о времени и реальности. Чтобы снять напряжение, отметим, что если бы вы поставили *детекторы* фотонов перед каждой щелью, то показания детекторов точно бы определили, прошёл ли фотон через левую щель или через правую щель, и тогда не будет способа стереть такую информацию — тогда не будет и способа снова получить интерференционную картину. Но маркирующие приборы тем и отличаются, что они обеспечивают только потенциальную возможность определения информации о выборе пути — а потенциальные возможности являются как раз такими вещами, которые могут быть разрушены. Маркирующий прибор модифицирует прохождение фотона таким образом, что, грубо говоря, он всё ещё идёт обоими путями, но левая часть его волны вероятности размыта относительно правой или правая часть его волны вероятности размыта относительно левой. Из-за этого упорядоченная последовательность пиков и впадин, которая обычно появляется от каждой щели, — как на рис. 4.2б — также размывается, так что интерференционная картина на детекторном экране не формируется. Хотя решающим для понимания является то, что обе волны, и левая, и правая, всё ещё существуют. Ластик работает, потому что он снова фокусирует волны. Подобно паре зеркал он компенсирует размытие, возвращая обе волны к резкому фокусу и позволяя им снова создать интерференционную картину. Как если бы после того, как маркирующие устройства выполнили свою задачу, интерференционная картина исчезла из вида, но терпеливо находилась бы в ожидании, пока кто-нибудь или что-нибудь не воскресило её.

Это объяснение могло бы сделать квантовый ластик немного менее удивительным, но тут имеется финал — ошеломляющий вариант эксперимента с квантовым ластиком, который ещё более сотрясает привычные представления о пространстве и времени.

Формируя прошлое^[46]

Этот эксперимент, *квантовый ластик с отложенным выбором*, также

был предложен Скалли и Дрюлем. Он начинается с эксперимента со светоделителем, показанным на рис. 7.1, изменённым путём введения двух так называемых даун-конверторов^[47], по одному на каждый путь. Даун-конвертор — это прибор, который получает один фотон на входе и производит два фотона на выходе, каждый с половиной энергии («даун-преобразование») от исходного. Один из двух фотонов (так называемый *сигнальный фотон*) направляется вдоль пути, по которому к детекторному экрану следовал исходный фотон. Другой фотон, произведённый даун-конвертором (именуемый *холостым фотоном*), посылается в совершенно другом направлении, как показано на рис. 7.5а. В каждом эксперименте мы можем определить, какой путь к экрану выбрал сигнальный фотон, путём наблюдения, который из даун-конверторов испустил холостой фотон-партнёр. И снова возможность получить информацию о выборе пути сигнального фотона — даже хотя она является полностью косвенной, — вызывает предотвращение возникновения интерференционной картины.



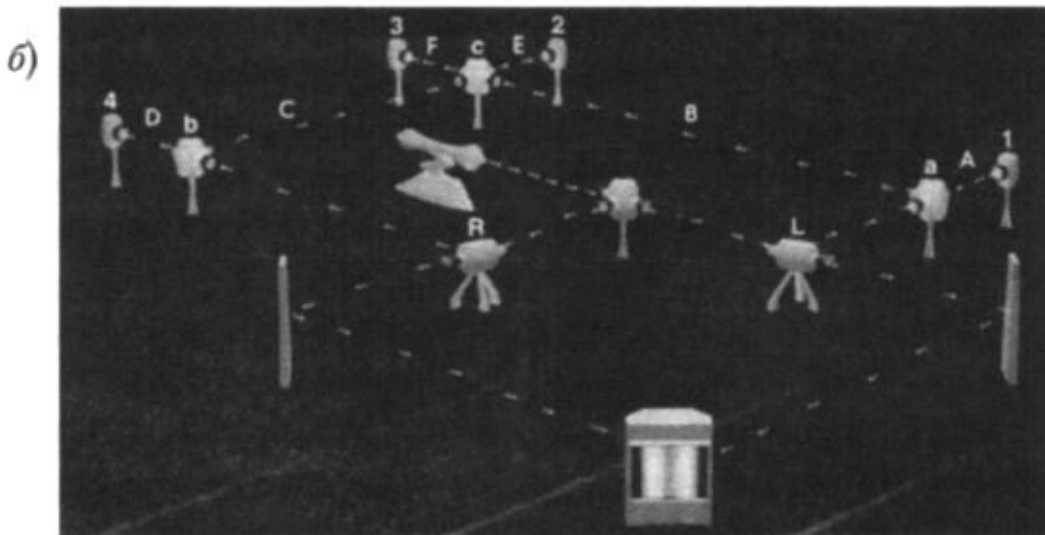


Рис. 7.5. (а) Эксперимент со светоделителем луча, дополненный даун-конверторами, не даёт интерференционной картины, поскольку холостые фотоны сообщают информацию выбора пути. (б) Если холостые фотоны не детектируются непосредственно, а вместо этого посылаются через изображённый лабиринт, тогда из результатов эксперимента может быть выделена интерференционная картина. Холостые фотоны, которые регистрируются детекторами 2 или 3, не дают информации о выборе пути и, следовательно, их сигнальные фотоны дают интерференционную картину

Приступим к самой таинственной части. Что если мы преобразуем эксперимент так, чтобы стало невозможно определить, из какого даун-конвертора был испущен холостой фотон? Что если мы сотрём информацию о выборе пути, заключённую в холостом фотоне? Произойдёт нечто поразительное: хотя мы ничего не делаем непосредственно с сигнальным фотоном, путём уничтожения информации о выборе пути, переносимой его холостым партнёром, мы можем восстановить интерференционную картину из сигнальных фотонов. Позвольте мне показать вам, как это происходит, поскольку это действительно примечательно.

Взгляните на рис. 7.5б, в который включены все существенные идеи. Но не пугайтесь. Он проще, чем кажется, и теперь мы разберём его поэтапно. Установка, изображённая на рис. 7.5б, отличается от установки на рис. 7.5а принципом детектирования холостых фотонов после их

испускания. На рис. 7.5a мы детектировали их непосредственно и могли немедленно определить, из какого даун-конвертора вылетел каждый, и значит определить, какой путь выбрал сигнальный фотон. В новом эксперименте каждый холостой фотон посылается через лабиринт, который делает невозможным такое определение. Представим, что холостой фотон выпущен из даун-конвертора, отмеченного «L». Вместо того чтобы немедленно попасть в детектор (как на рис. 7.5a), этот фотон попадает на светоделитель (отмеченный «a»), так что имеется одинаковая вероятность пойти по пути A или B. Если он пойдёт вдоль пути A, он попадёт в детектор фотонов (отмеченный «1»), и его прибытие будет зарегистрировано. Но если холостой фотон пойдёт вдоль пути B, то будет подвержен следующим манипуляциям. Он будет направлен на другой светоделитель (отмеченный «c»), так что будет иметь 50%-ю вероятность быть направленным вдоль пути E к детектору, отмеченному «2», и 50%-ю вероятность пойти вдоль пути F к детектору, отмеченному «3». Теперь — следите за мной, так как здесь вся суть, — те же самые рассуждения, применённые к холостому фотону, эмитированному из другого даун-конвертора, отмеченного «R», говорят, что если вспомогательный фотон пойдёт по пути D, он будет записан детектором «4», но если он пойдёт по пути C, то будет обнаружен или детектором «3», или детектором «2», в зависимости от пути, по которому он следовал после прохождения через светоделитель «c».

Разберёмся, для чего нужны все эти усложнения. Заметьте, что если холостой фотон обнаружен детектором 1, мы знаем, что соответствующий сигнальный фотон выбрал левый путь, ^[48] поскольку для холостого фотона, который был эмитирован из даун-конвертора R, нет способа найти путь к этому детектору. Аналогично, если холостой фотон обнаружен детектором 4, мы знаем, что его сигнальный фотон-партнёр выбрал правый путь. Но если холостой фотон попал в детектор 2, мы не можем определить, какой путь выбрал его сигнальный фотон-партнёр, поскольку имеются равные шансы, что он эмитирован даун-конвертором L и следует пути B–E или что он эмитирован даун-конвертором R и следует пути C–E. Аналогично, если вспомогательный фотон обнаружен детектором 3, он может быть эмитирован даун-конвертором L и путешествовать по пути B–F или даун-конвертором R и путешествовать по пути C–F.

Итак, для сигнальных фотонов, холостые партнёры которых обнаружены детектором 1 или 4, мы имеем информацию о выбранном пути, но для сигнальных фотонов, холостые партнёры которых обнаружены детектором 2 или 3, информация о выборе пути стёрта.

Означает ли это стирание части информации о выборе пути — хотя мы ничего не делаем с сигнальными фотонами непосредственно — что интерференционные эффекты восстанавливаются? Это действительно так, но только для тех сигнальных фотонов, чьи холостые партнёры попали в детектор 2 или детектор 3. Именно, места попадания всех сигнальных фотонов на экран будут давать картинку, похожую на данные для рис. 7.5а, *не показывающего даже самого слабого намёка на интерференционную картину*, что характерно для фотонов, которые идут либо одним, либо другим путём. Но если мы рассмотрим лишь подмножество результирующих точек — например, от тех сигнальных фотонов, для которых холостые фотоны попали в детектор 2, — то это подмножество точек *будет* давать интерференционную картину! Эти сигнальные фотоны — холостые партнёры которых, по случайности, не дали информации о выборе пути — ведут себя, как будто они путешествовали обоими путями! Если мы настроим оборудование так, что экран будет показывать красную точку для положения каждого сигнального фотона, холостой фотон которого был обнаружен детектором 2, и зелёную точку для всех остальных, то те, у кого нарушено восприятие цвета, не будут видеть интерференционную картину, но все остальные будут видеть, что красные точки упорядочены в яркие и тёмные полосы — в интерференционную картину. То же самое останется верно и для детектора 3 вместо детектора 2. Но такой интерференционной картины не будет, если мы выделим сигнальные фотоны, холостые фотоны которых обнаружены детектором 1 или детектором 4, поскольку эти холостые фотоны дают информацию о выбранном пути своих сигнальных партнёров.

Эти результаты, которые подтверждены экспериментом,^{[190](#)} поражают: из-за включения даун-конверторов, которые потенциально могут обеспечить информацию выбора пути, мы теряем интерференционную картину, как на рис. 7.5а. А без интерференции мы, естественно, заключали, что каждый фотон проходил или вдоль правого пути, или вдоль левого. Но теперь мы узнали, что это заключение было поспешным. Путём аккуратного удаления потенциальной информации о выборе пути, переносимой некоторыми из холостых фотонов, мы можем уговорить данные отдать интерференционную картину, и это свидетельствует, что некоторые фотоны на самом деле двигаются обоими путями.

Отметим также самый яркий результат: три дополнительных светоделителя и четыре детектора холостых фотонов могут располагаться на другой стороне лаборатории или даже на другой стороне Вселенной, поскольку ничто в нашем обсуждении не зависело от того, получается ли

данный холостой фотон до или после того, как его сигнальный партнёр попадёт на экран. Представим, что все эти приборы удалены на большое расстояние, для определённости — на десять световых лет, и подумаем, к чему это приведёт. Вы сегодня проводите эксперимент на рис. 7.5б, записывая — одно за другим — места падения гигантского числа сигнальных фотонов, и не наблюдаете признаков интерференции. Если кто-нибудь попросит вас объяснить результаты, может возникнуть соблазн сказать, что из-за наличия холостых фотонов имеет место информация о выборе пути, и значит каждый сигнальный фотон определённо шёл или вдоль левого, или вдоль правого пути, исключая любую возможность интерференции. Но, как видно выше, это будет опрометчивое заключение о происходящем; это будет совершенно непродуманное описание прошлого.

Десятью годами позднее вы увидите, что четыре детектора фотонов зарегистрируют — один за другим — холостые фотоны. Если затем вы получите информацию о том, какие холостые фотоны попали, скажем, в детектор 2 (например, первый, седьмой, девятый, двенадцатый... холостые фотоны), и вернётесь к данным, которые собрали годами ранее и выделите положения соответствующих сигнальных фотонов на экране (первого, седьмого, девятого, двенадцатого... сигнальных фотонов), вы обнаружите, что выделенные данные дают интерференционную картину, а это говорит о том, что соответствующие сигнальные фотоны должны описываться как прошедшие по обоим путям. Наоборот, если спустя 9 лет и 364 дня после того, как вы собрали данные по сигнальным фотонам, техник-шутник саботирует эксперимент путём удаления светоделителей «а» и «b» — гарантируя, что когда вспомогательные фотоны придут на следующий день, они все попадут в детектор 1 или детектор 4, что сохранит всю информацию о выборе пути, то когда вы получите эту информацию, вы сделаете заключение, что *каждый* сигнальный фотон двигался вдоль левого пути или вдоль правого пути, и интерференционная картина не может быть извлечена из данных по сигнальным фотонам. Таким образом, как убедительно показывает это обсуждение, история, которую вы пытаетесь рассказать, чтобы объяснить результаты регистрации сигнальных фотонов, существенно зависит от измерений, проведённых десятью годами позже сбора этих данных.

Позвольте мне ещё раз подчеркнуть, что будущие измерения совершенно не изменяют чего-либо из того, что имело место в вашем сегодняшнем эксперименте; будущие измерения никоим образом не изменяют данные, которые вы собрали сегодня. Но будущие измерения *влияют* на некоторые подробности того, как вы объясняете то, что

произошло сегодня. До того как вы получите результаты измерений холостых фотонов, вы на самом деле совсем не можете сказать что-либо об истории выбора пути любого данного сигнального фотона. Однако когда вы получили результаты, вы заключаете, что сигнальные фотоны, холостые партнёры которых успешно использованы для получения информации о выборе пути, могут быть описаны как прошедшие — годы назад — либо слева, либо справа. Вы также придёте к заключению, что сигнальные фотоны, холостые партнёры которых уничтожили информацию выбора пути, не могут быть описаны как определённо прошедшие — годы назад — по одному или по другому пути (заключение, которое вы можете убедительно подтвердить с использованием вновь полученных данных по холостым фотонам, чтобы выявить ранее скрытую интерференционную картину среди этого последнего класса сигнальных фотонов). Таким образом, мы видим, что будущее помогает сформировать историю, которую вы рассказываете о прошлом.

Эти эксперименты конфликтуют с нашими обычными представлениями о пространстве и времени. Нечто, что имеет место намного позже и очень далеко от *чего-то другого*, тем не менее существенно для нашего описания этого *чего-то другого*. По любому классическому счёту — по здравому смыслу — это просто сумасшествие. Конечно, дело в этом: здравый смысл неприменим для использования в квантовой Вселенной. Из обсуждения парадокса Эйнштейна–Подольского–Розена мы узнали, что квантовая физика нелокальна в пространстве. Если вы полностью усвоили этот урок, то эксперименты, которые включают в себя запутывание и через пространство, и через время, не будут казаться такими уж странными. Но по стандартам повседневного опыта они определённо таковы.

Квантовая механика и опыт

Я помню своё воодушевление, когда впервые узнал об этих экспериментах. Я чувствовал, что мне дали мельком увидеть скрытую сторону реальности. Здравый смысл — земная, обыкновенная, повседневная деятельность — внезапно оказался частью классической шарады, скрывающей истинную природу нашего квантового мира. Мир повседневности внезапно оказался не чем иным, как вывернутым наизнанку магическим действием, внушившим своим зрителям веру в обычные, привычные концепции пространства и времени, в то время как

удивительная истина квантовой реальности, ускользая от взгляда, тщательно защищена природой.

В последние годы физики приложили много усилий в попытках объяснить уловки природы, чтобы точно понять, как фундаментальные законы квантовой физики превращаются в классические законы, которые столь успешны при объяснении повседневного опыта, — в сущности, чтобы разобраться, как атомное и субатомное скидывают магическую таинственность, когда они объединяются, чтобы сформировать макроскопический объект. Исследования продолжаются, но многое уже понято. Посмотрим на некоторые вещи, особенно уместные в связи с вопросом о стреле времени, но теперь с точки зрения квантовой механики.

Классическая механика основывается на уравнениях, которые Ньютон открыл в конце 1600-х гг. Электромагнетизм основывается на уравнениях, которые Максвелл открыл в поздние 1800-е гг. Специальная теория относительности основывается на уравнениях, которые Эйнштейн открыл в 1905 г., а общая теория относительности основывается на уравнениях, которые он открыл в 1915 г. Что общего имеют все эти уравнения, и что является центральным для дилеммы стрелы времени (как объясняется в предыдущей главе), так это совершенно симметричная трактовка прошлого и будущего в них. Нигде, ни в одном из этих уравнений нет чего-либо, что отличает время, направленное «вперёд», от времени, направленного «назад». Прошлое и будущее рассматриваются на одинаковых основаниях.

Квантовая механика основывается на уравнении, которое Эрвин Шрёдингер открыл в 1926 г.^[91] Вам не нужно знать подробностей об этом уравнении, кроме того факта, что в качестве входных данных в него входит квантово-механическая вероятностная волна в один момент времени, как на рис. 4.5, и оно позволяет определить, как вероятностная волна будет выглядеть в любой другой момент времени, более ранний или более поздний. Если вероятностная волна ассоциируется с частицей, такой как электрон, вы можете использовать её для предсказания вероятности, с которой в заданное время эксперимент обнаружит электрон в заданном месте. Подобно классическим законам Ньютона, Максвелла и Эйнштейна, квантовый закон Шрёдингера включает в себя равноправное рассмотрение будущего и прошлого. «Фильм», показывающий вероятностную волну стартующей в *таком* виде и заканчивающейся в *этом*, может быть запущен в обратном направлении, — показывая вероятностную волну, стартующую в *этом* виде, а заканчивающую в *таком*, — и нет способа сказать, что одна эволюция правильна, а другая ложна. В уравнении Шрёдингера оба решения будут верны. Оба одинаково представляют осмысленные пути, по

которым возможно развитие.^[92]

Конечно, «фильм», о котором идёт речь, очень отличается от аналогов, использованных в предыдущей главе при анализе движения теннисного мяча или разбивающегося яйца. Мы не можем видеть волны вероятности непосредственно; не существует камеры, которая могла бы зафиксировать вероятностные волны на плёнку. Вместо этого мы можем описать вероятностные волны с использованием математических уравнений и представить себе простейшие из таких волн, имеющие форму как на рис. 4.5 и 4.6. Но единственный способ доступа к самим вероятностным волнам является косвенным, через процесс измерения.

То есть, как объяснялось в главе 4 и как видно в рассмотренных выше экспериментах, стандартная формулировка квантовой механики описывает эволюцию с использованием двух совершенно различных стадий. На первом этапе волна вероятности — или, точнее говоря, *волновая функция* — некоторого объекта, например электрона, эволюционирует в соответствии с уравнением, открытым Шрёдингером. Это уравнение гарантирует, что форма волновой функции изменяется гладко и постепенно, почти как волна на воде, когда она движется от одного берега озера к другому.^[49] В стандартном описании второй стадии путём измерения положения электрона реализуется связь электрона с наблюдаемой реальностью, и когда мы это делаем, форма его волновой функции мелется резко и прерывисто. Волновая функция электрона не похожа на более привычные примеры волн на воде или звуковых волн: когда мы измеряем положение электрона, его волновая функция образует пик, т. е. коллапсирует, падая до нуля везде, где частица не найдена, и вырастает до 100%-й вероятности в единственном месте, где частица найдена измерением (как показано на рис. 4.7).

Первая стадия — эволюция волновой функции в соответствии с уравнением Шрёдингера — является математически строгой, совершенно недвусмысленной и полностью принятой физическим сообществом. Вторая стадия — коллапс волновой функции при измерении — наоборот, является чем-то, что на протяжении последних восьмидесяти лет держит физиков, в лучшем случае, в тихом смущении, а в худшем — провоцирует проблемы, загадки и потенциальные парадоксы, ради которых жертвуют карьерами. Трудность, как отмечалось в конце главы 4, состоит в том, что в соответствии с уравнением Шрёдингера волновые функции *не* коллапсируют. Коллапс волновой функции представляет собой что-то дополнительное. Оно, это дополнение, было введено после открытия

Шрёдингером своего уравнения в попытке описать, что же видят экспериментаторы на самом деле. Хотя исходная, несконтрастированная волновая функция воплощает странную идею, что частица находится и тут, и там, экспериментаторы никогда не видят этого. Они всегда обнаруживают частицу определённо в том положении или другом; они никогда не видят её частично тут, а частично там; стрелка в измерительных приборах никогда не витает в состоянии некоторой призрачной смеси, указывая и на эту, и на ту величину.

То же самое происходит, конечно, при наших собственных повседневных наблюдениях окружающего мира. Мы никогда не видели, чтобы стул был и тут, и там; мы никогда не наблюдаем Луну одновременно в одной части ночного неба, а также и в другой; мы никогда не видим кота, который одновременно и жив, и мёртв. Понятие коллапса волновой функции присоединяется к нашему опыту путём постулирования, что акт измерения заставляет волновую функцию отказаться от квантовой неопределённости и сделать одну из множества потенциальных возможностей (частица здесь или частица там) действительной.

Загадка квантового измерения

Но почему проведение измерения экспериментатором заставляет волновую функцию коллапсировать? Фактически, действительно ли коллапс волновой функции происходит, и если он происходит, что реально происходит на микроскопическом уровне? Вызывает ли коллапс любое и всякое измерение? Когда происходит коллапс и как долго длится? Поскольку в соответствии с уравнением Шрёдингера волновая функция не коллапсирует, какое уравнение описывает вторую стадию квантовой эволюции и как это новое уравнение свергает с престола шрёдингеровское, узурпируя его обычную нерушимую власть над квантовыми процессами? И, что важно в смысле обсуждения стрелы времени, в то время как уравнение Шрёдингера, которое управляет первой стадией, не делает различий между прямым и обратным направлением во времени, не вводит ли уравнение для второго этапа фундаментальную асимметрию между временем до и временем после измерения? То есть, не вводит ли квантовая механика, включая её связь с повседневным миром через измерения и наблюдения, стрелу времени в основные законы физики? В конце концов, мы обсуждали, как квантовая трактовка прошлого отличается от трактовки прошлого в классической физике, и под прошлым мы понимали то, что

происходит перед тем, как имеет место определённое квантовое измерение. Поэтому не устанавливают ли измерения, воплощённые в коллапсе волновой функции, асимметрию между прошлым и будущим: между тем, что было до измерения, и тем, что будет после?

Эти вопросы упорно сопротивляются полному решению, и они остаются источником противоречий. Тем не менее спустя десятилетия успехов предсказательную мощь квантовой теории трудно скомпрометировать. Квантовая теория, включающая две стадии эволюции, хотя вторая стадия и остаётся таинственной и непонятной, правильно предсказывает вероятности результатов измерений. И эти предсказания подтверждаются повторением данного эксперимента снова и снова и проверкой частоты, с которой обнаруживаются те или иные результаты. Фантастический экспериментальный успех этого подхода намного перевешивает дискомфорт от отсутствия точного описания того, что на самом деле происходит на второй стадии.

Но дискомфорт всегда рядом. И это не означает просто, что некоторые детали коллапса волновой функции не вполне определены. *Проблема квантового измерения*, как она называется, является проблемой, имеющей отношение к пределам и универсальности квантовой механики. Это нетрудно увидеть. Подход с двумя различными стадиями эволюции вводит пропасть между тем, что наблюдается (например, электрон, или протон, или атом), и экспериментатором, проводящим наблюдения. Перед тем как экспериментатор появляется на сцене, волновая функция радостно и спокойно эволюционирует в соответствии с уравнением Шрёдингера. Но когда экспериментатор вмешивается в процесс для проведения измерения, правила игры неожиданно меняются. Уравнение Шрёдингера отбрасывается в сторону и наступает коллапс второй стадии эволюции. Теперь, поскольку нет разницы между атомами, протонами и электронами, которые составляют экспериментатора и оборудование, которое он использует, и атомами, протонами и электронами, которые он изучает, так почему же имеется столь большое различие в том, как их трактует квантовая механика? Если квантовая механика является универсальной теорией, которая применима без ограничений к *чему угодно*, наблюдаемое и наблюдатель должны рассматриваться в точности одинаковым образом.

Нильс Бор был не согласен. Он утверждал, что экспериментаторы и их оборудование *действительно* отличаются от элементарных частиц. Хотя они и сделаны из одинаковых частиц, они являются «большими» собраниями элементарных частиц и поэтому управляются законами классической физики. Где-то между мельчайшим миром отдельных атомов

и субатомных частиц и привычным миром людей и их оборудования правила меняются, поскольку меняются размеры. Мотивировка для принятия этого разделения ясна: крохотные частицы, в соответствии с квантовой механикой, могут находиться в состоянии размытой смеси тут и там, тогда как мы не видим подобного поведения в большом, повседневном мире. Но где точно находится граница? И, что жизненно важно, как два набора правил согласуются, когда большой повседневный мир сталкивается с очень маленьким миром атомов, как в случае измерения? Бор настойчиво декларировал, что эти вопросы должны быть вынесены за границы обсуждения. Под этим он понимал, по правде говоря, что они находятся за границами того, на что он или кто-либо другой сможет дать ответ. И поскольку даже без ответа на эти вопросы теория даёт поразительно точные предсказания, долгое время такие проблемы находились в самой нижней части списка важнейших вопросов, которые рассматривались физиками.

Но для того чтобы полностью понять квантовую механику, чтобы определить до конца, что она говорит о реальности, и чтобы установить, какую роль она может играть в выборе направления стрелы времени, необходимо полное понимание проблемы квантового измерения.

В следующих двух разделах мы опишем некоторые из наиболее заметных и многообещающих попыток это сделать. Если вы захотите сразу перейти к последнему разделу, посвящённому стреле времени в квантовой механике, то отметим, что ответ таков. Множество хитроумных работ по проблеме квантовых измерений привело к значительным успехам, но принимаемое большинством решение проблемы, по-видимому, всё ещё находится вне пределов нашей досягаемости. Многие рассматривают это как самый важный пробел в формулировке квантовых законов.

Реальность и проблема квантового измерения

За время существования квантовой теории поступило множество предложений для решения проблемы квантового измерения. Ирония заключается в том, что, хотя они влекли за собой различные концепции реальности (некоторые — радикально различные), когда дело касалось предсказаний того, что исследователь будет измерять почти во всех экспериментах, все они были в согласии друг с другом и каждое работало подобно заклинанию. Каждое предложение показывало один и тот же спектакль, хотя, если вы посмотрите за кулисы, то увидите, что их способы

действия существенно отличаются.

Когда речь идёт о развлечении, вы обычно не хотите знать, что происходит за кулисами; вы вполне удовлетворяетесь тем, что обращаете внимание исключительно на результат. Но когда речь идёт о понимании Вселенной, имеется непреодолимое желание отдёрнуть все шторы, открыть все двери и полностью обнажить глубинные внутренние механизмы реальности. Бор считал это побуждение безосновательным и вводящим в заблуждение. Для него реальность *есть* её представление. Как в монологе Сполдинга Грея^[50], голые измерения экспериментатора и являются всем спектаклем. Ничего другого нет. Согласно Бору, «за кулисами» ничего нет. Идея попытаться проанализировать, как, когда и почему квантовая волновая функция отбрасывает все возможности, кроме одной, и даёт одно определённое число на измерительном приборе, — ошибочная идея. Измеренное число само по себе является всем, что заслуживает внимания.

Этот взгляд господствовал в течение десятилетий. Однако его успокаивающее действие на ум, пытающийся, несмотря ни на что, понять квантовую теорию, никак не способствует ощущению, что превосходная предсказательная сила квантовой механики означает, что *это и есть* проход в скрытую реальность, лежащую в основе нашей Вселенной. Успокаивающее действие этого подхода не может помочь идти дальше и понять, как квантовая механика связана с повседневным опытом — как она перекидывает мост через пропасть между волновой функцией и наблюдением, и какая скрытая реальность лежит в основе наблюдений. Многие исследователи приняли этот вызов; ниже приводятся некоторые разработанные ими подходы.

Один подход, исторические корни которого восходят к Гейзенбергу, заключается в отказе от взгляда на волновую функцию как на объективное свойство квантовой реальности и, вместо этого, во взгляде на неё только как на отражение наших знаний о реальности. Перед проведением эксперимента мы не знаем, где находится электрон, и, как предполагает этот взгляд, наше неведение относительно его расположения отражается электронной волновой функцией, описывающей электрон как находящийся, возможно, в ряде различных мест. Однако в момент, когда мы измеряем его положение, наше знание о том, где он находится, внезапно изменяется: теперь мы знаем его положение, в принципе, с абсолютной точностью. (В соответствии с принципом неопределённости, если мы знаем его положение, мы неизбежно оказываемся в неведении относительно его скорости, но это не является предметом текущего обсуждения.) Это резкое изменение наших знаний, в соответствии с данным взглядом, отражается в

резком изменении электронной волновой функции: она внезапно коллапсирует и принимает форму резкого пика, как на рис. 4.7, фиксируя наше точное знание положения электрона. В таком подходе резкий коллапс волновой функции совершенно неудивителен: он есть не что иное, как резкое изменение в знании, которое мы все ощущаем, когда узнаём что-либо новое.

Второй подход, предложенный в 1957 г. студентом Джона Уилера Хью Эвереттом, вообще отрицает, что волновая функция коллапсирует. Вместо этого любой и каждый потенциальный результат, включённый в волновую функцию, реализуется; однако происходит это в его собственной отдельной Вселенной. В этом подходе, известном как *многомировая интерпретация*, понятие «Вселенная» расширяется, чтобы включить бесчисленные «параллельные вселенные» — бесчисленные версии нашей Вселенной, — так что всё, что может произойти в соответствии с предсказаниям квантовой механики, даже с ничтожной вероятностью, *действительно* происходит, по меньшей мере в одной копии. Если волновая функция говорит, что электрон может быть здесь, там и где-нибудь далеко, тогда в одной вселенной копия вас самих найдёт его здесь; в другой вселенной другая ваша копия найдёт его там; а в третьей вселенной ещё одна ваша копия найдёт электрон очень далеко. Последовательность наблюдений, которую каждый из нас делает каждую секунду, таким образом, отражает реальность, имеющую место только в одной части этой чудовищной, бесконечной сети вселенных, каждая из которых населена копиями вас, меня и любого другого, кто ещё живёт во вселенной, в которой некоторое наблюдение дало определённый результат. В одной такой вселенной вы сейчас читаете эти слова, в другой вы прервались, чтобы походить по Интернету, ещё в другой вы с волнением дожидаетесь, когда поднимется занавес перед вашим дебютом на Бродвее. Это похоже на то, как если бы существовал не единственный блок пространства-времени, изображённый на рис. 5.1, а бесконечное количество, среди которых каждый реализует одну возможную последовательность событий. В многомировой интерпретации, следовательно, ни один потенциальный результат просто не остаётся потенциальным. Волновые функции не коллапсируют. Каждый потенциальный результат проявляется в одной из параллельных вселенных.

Третье предложение, разработанное в 1950-е гг. Дэвидом Бомом, — тем самым физиком, с которым мы сталкивались в главе 4, когда обсуждали парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена, — использует совершенно другой подход.^{[193](#)} Бом утверждал, что частицы, такие как электроны, обладают определёнными положениями и определёнными скоростями,

точно как в классической физике и точно так, как надеялся Эйнштейн. Но, в соответствии с принципом неопределённости, эти свойства скрыты от взгляда; они являются примерами *скрытых переменных*, упоминавшихся в главе 4. Вы не можете определить обе переменные одновременно. По Бому, такая неопределённость представляет предел того, что мы можем знать, но ничего не предполагает о действительных атрибутах самих частиц. Его подход не противоречит результатам Белла, поскольку, как мы обсуждали в конце главы 4, обладание определёнными свойствами, запрещёнными принципом неопределённости, не исключено; исключена только локальность, а подход Бом не локален.^[94] Бом представил, что волновая функция частицы является другим, *отдельным элементом реальности*, таким, который существует *в дополнение к самой частице*. Нет частиц или волн, как полагала философия дополнительности Бора; в соответствии с Бомом, есть частицы и волны. Более того, Бом постулировал, что волновая функция частицы взаимодействует с самой частицей — она «направляет» частицу или «толкает» её — таким способом, что это определяет её последующее движение. В то время как этот подход полностью согласуется с правильными предсказаниями стандартной квантовой механики, Бом нашёл, что изменения волновой функции в одном месте могут немедленно сказаться на удалённой частице, что явно обнаруживает нелокальность его подхода. В эксперименте с двумя щелями, например, каждая частица проходит через одну щель или через другую, тогда как их волновая функция проходит через обе щели и допускает интерференцию. Поскольку волновая функция управляет движением частицы, то не столь уж и удивительно, что, как показывают уравнения, частица охотнее окажется там, где величина волновой функции велика, и неохотно там, где мала, объясняя данные на рис. 4.4. В подходе Бом нет отдельной стадии коллапса волновой функции, поскольку, если вы измеряете положение частицы и находите её *здесь*, то это действительно то место, где она была моментом раньше измерения.

Четвёртый подход, разработанный итальянскими физиками Джанкарло Жирарди, Альберто Римини и Туллио Вебером, смело изменяет уравнение Шрёдингера неким хитрым способом, который почти не сказывается на эволюции волновых функций отдельных частиц, но имеет существенное влияние на квантовую эволюцию, когда применяется к «большим» повседневным объектам. Предложенная модификация полагает, что волновые функции в своей основе нестабильны; даже без всякого вмешательства, предположили эти исследователи, рано или поздно каждая волновая функция коллапсирует к пикообразной форме по своему

собственному желанию. Жирарди, Римини и Вебер постулировали, что для индивидуальной частицы коллапс волновой функции происходит спонтанно и хаотично, возникая в среднем только раз в каждый миллиард лет или около того.^[95] Это настолько редко, что вносит только очень слабое изменение в обычное квантово-механическое описание отдельной частицы, и это хорошо, поскольку квантовая механика описывает микромир с беспрецедентной точностью. Но для больших объектов, таких как экспериментатор и его оборудование, которые имеют миллиарды и миллиарды частиц, вероятность будет настолько большой, что в мельчайшую долю любой заданной секунды постулированный спонтанный коллапс произойдёт по меньшей мере с одной отдельной частицей, заставив сколлапсировать её волновую функцию. И, как объясняют Жирарди, Римини, Вебер и другие, запутанная природа всех индивидуальных волновых функций в большом объекте обеспечивает, что этот коллапс инициирует разновидность квантового эффекта домино, при котором волновые функции всех составляющих частиц тоже коллапсируют. Так как это происходит в крошечную долю секунды, предлагаемая модификация обеспечивает, что большие объекты, по существу, всегда находятся в одной определённой конфигурации: стрелки на измерительных приборах всегда указывают на одну определённую величину; Луна всегда находится в одном определённом положении в небе; коты всегда или мертвы, или живы.

Каждый из этих подходов, равно как и ряд других, которые мы не хотим обсуждать, имеет своих сторонников и противников. Подход «волновой функции как знания» ловко обходит проблему коллапса волновой функции путём отрицания реальности волновых функций, сводя их вместо этого всего лишь к способу описания того, что мы знаем. Но почему, спросит противник, фундаментальная физика должна быть так тесно связана с человеческим знанием? Если бы здесь не было нас, чтобы наблюдать этот мир, то волновые функции никогда бы не коллапсировали или, может быть, вообще не существовало бы самой концепции волновой функции? Разве Вселенная была совершенно другой до того, как на планете Земля появилось человеческое сознание? Что если вместо экспериментаторов-людей наблюдателями являются только мыши, или муравьи, или амёбы, или компьютеры? Будет ли изменение в их «знании» достаточным, чтобы его можно было связать с коллапсом волновой функции?^[96]

Напротив, многомировая интерпретация избегает самого понятия коллапса волновой функции, поскольку в этом подходе волновые функции

не коллапсируют. Но ценой этого является чудовищное разрастание Вселенной, что многие противники этой интерпретации считают совершенно недопустимым.^[97] Подход Бома также избегает коллапса волновой функции; но, утверждают его противники, допуская независимую реальность как частиц, так и волн, теория теряет экономичность. Более того, справедливо утверждают противники, в формулировке Бома волновые функции могут передавать влияние на частицы, которые они направляют, со скоростью, превышающей скорость света. Сторонники замечают, что первое возражение в лучшем случае субъективно, а последнее согласуется с нелокальностью, которая, как показал Белл, неизбежна, так что критика неубедительна. Тем не менее, может быть незаслуженно, подход Бома никогда не был популярным.^[98] Подход Жирарди–Римини–Вебера прямо включает коллапс волновой функции путём добавления к уравнениям нового спонтанного механизма коллапса. Но, отмечают противники, тут всё ещё нет и намёка на экспериментальное подтверждение предложенной модификации уравнения Шрёдингера.

Поиск ясной и прозрачной связи между формализмом квантовой механики и опытом повседневной жизни будет, несомненно, продолжаться до конца, и трудно сказать, который из известных подходов, если среди них такой вообще есть, в конечном счёте будет принят большинством. Если бы физики сегодня проголосовали, я не думаю, что нашёлся бы несомненный фаворит. К несчастью, экспериментальные данные могут оказать ограниченную помощь. Хотя предложение Жирарди–Римини–Вебера даёт предсказания, которые могут в определённых ситуациях отличаться от стандартной квантовой механики с её двумя стадиями эволюции, отклонения слишком малы, чтобы их можно было зафиксировать современной технологией. Ситуация с другими тремя предложениями ещё хуже, поскольку они ещё более решительно препятствуют экспериментальной верификации. Они полностью согласуются со стандартным подходом, так что все они дают одинаковые предсказания для того, что можно было бы наблюдать или измерить. Они отличаются только в отношении того, что происходит за кулисами, если вообще что-то происходит. То есть они отличаются только в отношении того, что квантовая механика предполагает в качестве фундаментальной основы природы реальности.

Хотя проблема квантовых измерений остаётся нерешённой, на протяжении последних нескольких десятилетий был разработан подход, который, хотя ещё неполон, но имеет широкую поддержку как вероятный

компонент любого жизнеспособного решения. Он называется декогеренция^[51].

Декогеренция и квантовая реальность

Когда вы впервые сталкиваетесь с вероятностным аспектом квантовой механики, естественной реакцией является мысль, что это не более экзотично, чем вероятности, которые возникают при подбрасывании монетки или вращении рулетки. Но при знакомстве с квантовой интерференцией вы осознаёте, что вероятность в квантовой механике намного более фундаментальна. В повседневных примерах различными результатам — орёл против решки, красное против чёрного, один лотерейный номер против другого — присваиваются вероятности на основании понимания, что тот или иной результат определённо произойдёт и что каждый результат является конечным продуктом независимой, определённой истории. Когда монета подбрасывается, иногда вращательное движение таково, что выходит орёл, а временами таково, что выходит решка. Вероятность 50 на 50 мы относим не просто к конечному результату — орёл или решка, — но также к истории, которая привела к каждому результату. Половина возможных способов, которыми вы можете подбросить монету, приведут к орлу, а половина — к решке. Сами события, однако, являются совершенно отдельными, изолированными альтернативами. Нет смысла интересоваться, какие различные движения монеты усиливают друг друга, а какие гасят. Все они независимы.

Но в квантовой механике иная ситуация. Альтернативные пути, по которым электрон может следовать через две щели к детектору, — это не отдельные, изолированные истории. Возможные истории смешиваются, производя наблюдаемый результат. Некоторые пути усиливают друг друга, тогда как другие уничтожают друг друга. Такая квантовая интерференция между различными возможными историями отвечает за картину светлых и тёмных полос на детекторном экране. Так что *основное различие между квантовым и классическим понятиями о вероятности заключается в том, что первое подтверждено интерференции, а второе — нет.*

Декогеренция является широко распространённым явлением, которое наводит мост между квантовой физикой малого и классической физикой *не столь уж малого* через подавление квантовой интерференции — т. е. путём резкого уменьшения того, что является ключевым различием квантовой и классической вероятности. Важность декогеренции была осознана давно,

ещё в ранние времена квантовой теории, но её современное возрождение отсчитывается от плодотворной статьи немецкого физика Дитера Цей в 1970 г., [\[99\]](#) и с тех пор разрабатывалось многими исследователями, включая Эрика Йоса, тоже из Германии, и Войцеха Цурека из Лос-Аламосской национальной лаборатории в Нью-Мексико.

Идея такова. Когда уравнение Шрёдингера применяется в простой ситуации, такой как прохождение отдельного изолированного фотона через экран с двумя щелями, оно приводит к известной интерференционной картине. Но этот лабораторный пример имеет две весьма специфические особенности, которые не характерны для событий реального мира. Первая состоит в том, что вещи, с которым мы сталкиваемся в повседневной жизни, больше и сложнее, чем отдельный фотон. Вторая — в том, что вещи, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, не изолированы: они взаимодействуют с нами и с окружением. Книга, находящаяся сейчас в ваших руках, подвергается контакту с человеком и, вообще, постоянно бомбардируется фотонами и молекулами воздуха. Более того, поскольку сама книга состоит из многих молекул и атомов, эти постоянно дрожащие составляющие непрерывно сталкиваются друг с другом. То же самое справедливо для стрелок измерительных приборов, для котов, для человеческих мозгов и просто для всего, с чем вы сталкиваетесь в повседневной жизни. На астрофизических масштабах Земля, Луна, астероиды и другие планеты непрерывно бомбардируются фотонами Солнца. Даже частичка пыли, плавающая в темноте космического пространства, подвергается непрерывным толчкам низкоэнергетических микроволновых фотонов, которые начали путешествовать по пространству спустя небольшое время после Большого взрыва. Итак, чтобы понять, что квантовая механика говорит о событиях реального мира, — в противоположность рафинированным лабораторным экспериментам, — мы должны применить уравнение Шрёдингера к этим более сложным, более беспорядочным ситуациям.

По существу, это было то, на что обратил внимание Цей. Его работа и работы многих других, кто последовал за ним, открыли нечто действительно удивительное. Хотя фотоны и молекулы воздуха слишком малы, чтобы оказать существенное влияние на движение большого объекта, например книги или кота, но они в состоянии сделать кое-что другое. Они непрерывно «толкают» волновую функцию большого объекта или, говоря на языке физики, они возмущают её *когерентность*: они размывают упорядоченную последовательность гребней и впадин, следующих друг за другом. Это критично, поскольку упорядоченность волновой функции

является центральным свойством для генерирования интерференционных эффектов (см. рис. 4.2). Подобно тому как добавление маркирующих приборов в эксперимент с двумя щелями размывает результирующую волновую функцию и поэтому размывает интерференционные эффекты, постоянная бомбардировка объектов составными частями окружающей среды также препятствует возникновению интерференционных явлений. С другой стороны, раз квантовая интерференция более невозможна, вероятности, присущие квантовой механике, с любой практической точки зрения ведут себя подобно вероятностям, присущим подбрасываемой монете и вращающейся рулетке. Когда декогеренция, вызванная взаимодействием с окружающей средой, размывает волновую функцию, экзотическая природа квантовых вероятностей растворяется в более привычных вероятностях повседневной жизни.^[100] Это может означать решение загадки квантового измерения, которое, если действительно окажется решением, стало бы лучшим, на что мы можем надеяться. Я сначала опишу идею декогеренции в наиболее оптимистичном свете, а затем сделаю акцент на том, что ещё остаётся сделать.

Если волновая функция изолированного электрона показывает, что он имеет, скажем, 50% вероятности находиться здесь и 50% вероятности находиться там, мы должны интерпретировать эти вероятности, используя всю причудливость квантовой механики. Поскольку обе альтернативы могут проявить себя при смешивании и генерировать интерференционную картину, мы должны думать о них как о реальных в равной степени. Проще говоря, кажется, что электрон находится в обоих положениях. Что произойдёт, если мы измерим положение электрона неизолрованными лабораторными инструментами обычного размера? Тогда в соответствии с неопределённостью местонахождения электрона стрелка инструмента имеет 50% вероятности указать на одно значение и 50% вероятности — на другое. Но вследствие декогеренции стрелка не будет находиться в призрачной смеси, указывая на обе величины; вследствие декогеренции мы можем интерпретировать *эти* вероятности в обычном, классическом, повседневном смысле. Как монета имеет 50%-й шанс упасть орлом и 50%-й шанс упасть решкой, но падает *или* орлом, *или* решкой, так и стрелка прибора имеет 50%-й шанс указать на одну величину и 50%-й шанс указать на другую величину, но она определённо укажет на одну *или* на другую.

Сходные рассуждения применимы и для всех других сложных неизолрованных объектов. Если квантовые расчёты показывают, что кот, сидя в закрытом ящике, имеет 50% шансов быть мёртвым и 50% шансов быть живым — поскольку имеется 50% шансов, что электрон попадёт в

счётчик и запустит устройство, которое отравит кота ядовитым газом, — то декогеренция означает, что кот *не* будет пребывать в некотором абсурдном смешанном состоянии жизни и смерти. Хотя десятилетия жарких дебатов были посвящены обсуждению проблемы типа: что означает для кота быть одновременно мёртвым и живым? Как открытие ящика и наблюдение кота заставляют его выбирать определённое состояние — смерти или жизни? Декогеренция означает, что задолго до того, как вы откроете ящик, окружающая среда уже завершила миллиарды наблюдений кота, которые почти совсем без затрат времени заменили все мистические квантовые вероятности на их менее мистические классические двойники. Задолго до того, как вы посмотрели внутрь, окружающая среда заставила кота принять одно единственное, определённое состояние. Декогеренция заставляет многие странности квантовой механики «утечь» из больших объектов, так как эти квантовые странности кусочек за кусочком удаляются прочь бесчисленными налетающими частицами окружения.

Трудно было бы представить более удовлетворительное решение проблемы квантового измерения. Будучи более реалистичными и отказываясь от упрощающего предположения, которое игнорирует окружающую среду, — упрощения, которое было критически важным на ранних этапах развития квантовой механики, — мы бы обнаружили, что квантовая механика имеет встроенное решение проблемы измерения. Сознание человека, люди-экспериментаторы и наблюдения людьми не играли бы больше особой роли, поскольку они (мы!) были бы просто элементами окружающей среды, подобными молекулам воздуха и фотонам, которые могут взаимодействовать с данной физической системой. Также больше не было бы пропасти между эволюцией объекта и эволюцией при измерении этого объекта экспериментатором. Всё сущее — наблюдаемое и наблюдатель — существовало бы на одинаковом основании. Всё сущее — наблюдаемое и наблюдатель — подчинялось бы в точности одним и тем же квантово-механическим законам, как установлено уравнением Шрёдингера. Акт измерения больше не являлся бы чем-то специальным; он просто был бы одним из специальных примеров взаимодействия системы с окружающей средой.

Вот оно? Декогеренция разрешила проблему квантового измерения? Декогеренция ответственна за то, что волновая функция закрывает дверь всем, кроме одного потенциального исхода, к которому она может привести? Некоторые так думают. Такие исследователи, как Роберт Гриффитс из Карнеги Меллон, Роланд Омнес из Орси, нобелевский лауреат Мюррей Гелл-Манн из института Санта-Фе и Джим Хартл из

Калифорнийского университета в Санта-Барбаре достигли большого прогресса и утверждают, что они развили представление о декогеренции до состояния завершённой концепции (названной *декогерентными историями*), которая решает проблему измерения. Другие, вроде меня, заинтригованы, но ещё полностью не убеждены. Вы видите, что сила декогеренции в том, что она успешно удаляет искусственный барьер, установленный Бором между большими и малыми физическими системами, делая всё сущее управляемым одними и теми же квантово-механическими формулами. Это большой прогресс и, я думаю, Бор нашёл бы его вызывающим удовлетворение. Хотя нерешённая проблема квантового измерения никогда не мешала физикам проводить теоретические расчёты, согласующиеся с экспериментальными данными, она привела Бора и его коллег к квантово-механической системе взглядов с некоторыми явно неуклюжими свойствами. Многие находят, что система взглядов, нуждающаяся в неясном представлении о коллапсе волновой функции или неточном понятии «больших» систем, принадлежащих классической физике, слаба. Приняв во внимание декогеренцию, исследователи в значительной степени сделали эти смутные идеи необязательными.

Однако ключевая проблема, которую я обошёл в обсуждении, заключается в том, что хотя декогеренция подавляет квантовую интерференцию и поэтому заставляет таинственные квантовые вероятности быть похожими на их привычных классических двойников, *каждый потенциальный результат, включённый в волновую функцию, всё ещё соперничает за реализацию*. Так что мы всё ещё остаёмся в неведении, какой результат «победит» и куда «уйдут» другие возможности, когда это реально произойдёт. Когда подбрасывается монета, классическая физика даёт ответ на аналогичный вопрос. Она говорит, что если вы исследуете способ, которым подброшена монета, вы можете, в принципе, с адекватной точностью *предсказать*, упадёт она орлом или решкой. Следовательно, более внимательный анализ показывает, что деталями, которые вы сначала упустили, был определён в точности один результат. В квантовой физике нельзя сказать то же самое. Декогеренция позволяет интерпретировать квантовые вероятности почти как классические, но не даёт точных деталей, которые объясняют, как из множества возможных исходов выбирается один для действительной реализации.

Почти в духе Бора некоторые физики думают, что поиски объяснений таких вещей, как причина возникновения отдельного определённого результата, неконструктивны. Эти физики утверждают, что квантовая

механика, дополненная теорией декогеренции, является жёстко сформулированной теорией, предсказания которой описывают поведение лабораторных измерительных приборов. И, в соответствии с этой точкой зрения, *это* и есть цель науки. Попытки отыскать объяснение, *что реально происходит*, попытки побороться за понимание, *как получился частный результат в опыте*, попытки отыскать *другой уровень реальности* за показаниями детектора и компьютерными распечатками представляются как неоправданная интеллектуальная жадность.

Многие другие, включая меня, придерживаются другого взгляда. *Объяснение данных* — вот что является предметом науки. Многие физики думают, что наука должна включать в себя также и теории, которые, подтверждая экспериментальные данные, идут дальше к максимальному проникновению в природу реальности. Я сильно подозреваю, что ещё многое предстоит понять, чтобы сдвинуться в направлении полного решения проблемы измерений.

Так что, хотя многие согласны, что вызванная окружающей средой декогеренция является важнейшей частью структуры, перекидывающей мост над пропастью между квантовым и классическим, и в то время как многие надеются, что эти соображения однажды приведут к полной и убедительной связи между этими двумя областями, далеко не каждый убеждён, что мост уже полностью построен.

Квантовая механика и стрела времени

Итак, в каком же состоянии находится проблема измерений и что это означает для стрелы времени? Грубо говоря, имеется два класса предложений, для того чтобы связать здравый смысл с квантовой реальностью. В первом классе (например, волновая функция как знание, многомировая интерпретация, декогеренция) нет ничего, кроме уравнения Шрёдингера; все предложения просто обеспечивают различные способы интерпретации того, что уравнение означает для физической реальности.

Во втором классе (например, Бом, Жирарди–Римини–Вебер) уравнение Шрёдингера должно быть дополнено другими уравнениями (в случае подхода Бом уравнением, которое показывает, как волновая функция направляет частицу в её движении) или должно быть модифицировано (в случае подхода Жирарди–Римини–Вебера путём включения нового явного механизма коллапса). Ключевой вопрос для определения того, как эти предложения влияют на стрелу времени,

заключается в том, вводят ли они фундаментальную асимметрию между разными направлениями во времени. Вспомним, что уравнение Шрёдингера, равно как и уравнения Ньютона, Максвелла и Эйнштейна, рассматривает прямое и обратное направления во времени совершенно одинаково. Это не обеспечивает стрелу для эволюции во времени. Меняют ли это положение какие-либо из предложений решения проблемы измерения?

В первом классе предложений шрёдингеровская система взглядов совсем не модифицируется, так что симметрия времени сохраняется. Во втором классе симметрия времени может уцелеть, а может и не уцелеть, в зависимости от деталей. Например, подход Бома, предложившего новое уравнение, трактует будущее и прошлое на равных основаниях, так что не вводит асимметрии. Однако предложение Жирарди–Римини–Вебера вводит механизм коллапса, который *выделяет* стрелу времени — «расколлапсирование», когда волновая функция изменяется от пикообразной формы, являющейся результатом коллапса, к распределённой форме без резких пиков, не удовлетворяя модифицированным уравнениям Шрёдингера. Так что, в зависимости от конкретного предложения, квантовая механика, вместе с решением загадки квантового измерения, либо трактует каждое направление времени одинаково, либо нет. Рассмотрим следствия каждой возможности.

Если симметрия времени сохраняется (я полагаю, так и будет), все обоснования и все заключения прошлой главы могут быть использованы с минимальными изменениями и для квантовой области. Суть той физики, которая инициировала наше обсуждение стрелы времени, заключалась в симметрии классической физики по отношению к обращению времени. В то время как язык и структура квантовой физики отличаются от классической физики — волновые функции вместо положений и скоростей; уравнение Шрёдингера вместо законов Ньютона, — симметрия по отношению к обращению времени всех квантовых уравнений гарантирует, что трактовка стрелы времени остаётся без изменений. Энтропия в квантовом мире может быть определена в основном так же, как в классической физике при условии, что мы описываем частицы в терминах их волновых функций. И вывод, что энтропия должна всегда возрасти, — как в направлении, которое мы называем будущим, так и в направлении, которое мы называем прошлым, — всё ещё будет действителен.

Так что мы приходим к той же головоломке, с которой мы столкнулись в главе 6. Если мы принимаем наши наблюдения мира прямо сейчас как данные, как неоспоримо реальные, и если энтропия должна возрасти как

по направлению в будущее, так и по направлению в прошлое, как мы объясним, что мир имеет вид, который он имеет, и как он будет в последующем разворачиваться во времени? Снова присутствуют те же две возможности: или всё, что мы видим, неожиданно появилось в результате статистической флуктуации, возникновение которой можно ожидать время от времени в вечной Вселенной, которая растрчивает впустую значительную часть своего времени, оставаясь полностью разупорядоченной, или по некоторым причинам энтропия была поразительно низкой сразу после Большого взрыва и поэтому последние 14 млрд лет всё могло медленно развиваться и продолжит развиваться в будущем. Как и в главе 6, чтобы избежать трясины неверия в память и в записи и в законы физики, мы выберем вторую альтернативу — низкоэнтропийный взрыв — и попытаемся найти объяснение, как и почему всё началось в таком особом состоянии.

Если, с другой стороны, симметрия времени потеряна (если решение проблемы измерения, которое однажды станет общепризнанным, покажет фундаментально асимметричное рассмотрение будущего по отношению к прошлому в квантовой механике), это легко может обеспечить самое прямое объяснение стрелы времени. Может оказаться, например, что яйца разбиваются, но не собираются обратно, потому что существует решение квантово-механических уравнений для разбивающегося яйца, а для собирающегося обратно — нет, в отличие от того, что мы имели с использованием законов классической физики. Тогда обратный просмотр фильма о разбивающемся яйце покажет движение, которое не может произойти в реальном мире, что и объяснит, почему мы никогда такого не видим.

Возможно. Но, хотя это и выглядело бы как существенно иное объяснение стрелы времени, на самом деле оно может оказаться не настолько иным, как кажется. Как мы подчёркивали в главе 6, чтобы страницы романа *«Война и мир»* становились всё более разупорядоченными, они должны сначала быть упорядоченными; яйцо, чтобы стать неупорядоченным, когда оно разбито, должно быть сначала упорядоченным, целым яйцом; энтропия, чтобы возрастать по направлению в будущее, должна быть низкой в прошлом, так что вещи должны иметь потенциал упорядоченности, чтобы стать неупорядоченными. Однако только то, что закон трактует прошлое и будущее по-разному, не даёт гарантии, что закон предсказывает прошлое с более низкой энтропией. Закон всё ещё может подразумевать увеличение энтропии в направлении прошлого (возможно, энтропия будет расти по

направлению в прошлое и в будущее асимметрично), и даже возможно, что асимметричный во времени закон будет вовсе неспособен сказать что-либо о прошлом. Последнее верно для предложения Жирарди–Римини–Вебера, одного из существующих предложений, в которых нарушается симметрия времени. Когда предложенный ими механизм коллапса выполняет свой трюк, то нет способа отменить его — нет способа начать от сколлапсировавшей волновой функции и вернуть её к первоначальной форме. Точная форма волновой функции теряется в коллапсе (она превращается в узкий пик), так что невозможно только на основании этого пика реконструировать волновую функцию до коллапса.

Таким образом, хотя асимметричный во времени закон мог бы обеспечить частичное объяснение того, почему вещи разворачиваются в одном временном порядке и никогда в обратном, он может потребовать того же ключевого дополнения, которого требуют и симметричные во времени законы: объяснение того, почему энтропия была низкой в удалённом прошлом. Определённо, это верно для асимметричных во времени модификаций квантовой механики, которые были предложены до настоящего времени. Итак, если только какое-то будущее открытие не продемонстрирует две особенности, которые я рассматриваю как маловероятные, — асимметричное во времени решение проблемы квантовых измерений, которое бы дополнительно гарантировало, что энтропия уменьшается по направлению в прошлое, — наши усилия объяснить стрелу времени снова приведут нас к происхождению Вселенной, теме следующей части книги.

Как будет ясно из этих глав, анализ проблем космологии проходит через многие тайны и ведёт к самому сердцу пространства, времени и материи. Так что в путешествии по направлению к современным космологическим представлениям о стреле времени будет полезнее не нестись галопом вперёд, а скорее совершить обстоятельную прогулку по космической истории.

Часть III. Пространство-время и космология

Глава 8. О снежинках и пространстве-времени

Симметрия и эволюция космоса

Ричард Фейнман однажды сказал, что если бы ему пришлось описать самое важное открытие современной науки в одном предложении, он выбрал бы «Мир состоит из атомов». Когда мы осознаём, что наше понимание Вселенной так зависит от свойств и взаимодействий атомов, — начиная с причин, по которым светят звёзды и небо голубое, и до объяснения, почему вы чувствуете эту книгу в своих руках и видите эти слова своими глазами, — мы способны правильно оценить выбор Фейнмана для выделения квинтэссенции нашего научного наследия. Многие из сегодняшних ведущих учёных согласны, что если бы было предложено второе высказывание, они бы выбрали «Симметрия лежит в основе законов Вселенной». На протяжении последних нескольких сотен лет в науке было много переворотов, но самые прочные открытия имеют общую особенность: они определяют свойства естественного мира, которые остаются неизменными, даже когда подвергаются широкому набору преобразований. Эти неизменяемые свойства отражают то, что физики называют симметриями, и они имеют всё возрастающее и жизненно важное значение во многих крупнейших достижениях. Это даёт достаточное доказательство того, что симметрия — во всех её таинственных и тонких проявлениях — излучает яркий свет в темноту, где истина ожидает своего открытия.

Мы увидим, что история Вселенной — это в значительной степени история симметрии. Самые главные моменты эволюции Вселенной — это те, в которых равновесие и порядок внезапно изменялись, создавая космические арены, качественно отличные от арен предшествующих эпох. Современная теория придерживается точки зрения, что Вселенная пережила несколько таких переходов на протяжении самых ранних моментов её существования и что всё, с чем мы когда-либо сталкивались, является материальным следом более ранней, более симметричной космической эпохи. Но имеется даже ещё более глубокий смысл, сверхсмысл, в котором симметрия является ядром эволюционирующего космоса. Само время тесно переплетено с симметрией. Как станет ясно, практический скрытый смысл времени как меры изменения, точно так же как само существование той разновидности космического времени, которая позволяет осмысленно говорить о вещах вроде «возраста и эволюции

Вселенной в целом», ощутимо зависит от свойств симметрии. И когда учёные исследуют эту эволюцию, бросая взгляды назад, к началу, в поиске истинной природы пространства и времени, симметрия оказывается самым надёжным гидом, приводящим к догадкам и ответам, которые иначе были бы недостижимы.

Симметрия и законы физики

Симметрия встречается на каждом шагу. Возьмите в руку бильярдный шар и покрутите его по-всякому — поверните его вокруг любой оси, — и он будет выглядеть в точности таким же. Поместите простую круглую обеденную тарелку на подставку и вращайте относительно её центра: она выглядит абсолютно неизменно. Осторожно поймите недавно образовавшуюся снежинку и поверните её так, чтобы каждая вершина переместилась в положение, которое ранее занимала соседняя вершина, и вы с трудом сможете заметить, что вообще что-то делали с ней. Возьмите букву «А», поверните её относительно вертикальной оси, проходящей через вершину, и вы получите совершенную копию оригинала.

Как ясно из этих примеров, симметрии объекта — это манипуляции над ним, настоящие или воображаемые, при которых его внешний вид не подвергается изменениям. Чем разнообразнее преобразования, которые объект может перенести без заметного влияния на свой внешний вид, тем более симметричным он является. Идеальная сфера имеет очень высокую симметрию, поскольку любое вращение вокруг её центра — вокруг вертикальной оси, горизонтальной оси или, фактически, любой оси — не меняет её вида. Куб менее симметричен, поскольку только вращения на углы по 90° относительно осей, которые проходят через центры его граней (или комбинации таких вращений), оставляют его неизменным. Конечно, если кто-то осуществит любое другое вращение, как на рис. 8.1в, вы всё ещё можете распознать куб, но также ясно увидите, что кто-то его поворачивал. Наоборот, симметрии похожи на самого ловкого вора; это преобразования, которые не оставляют улик.

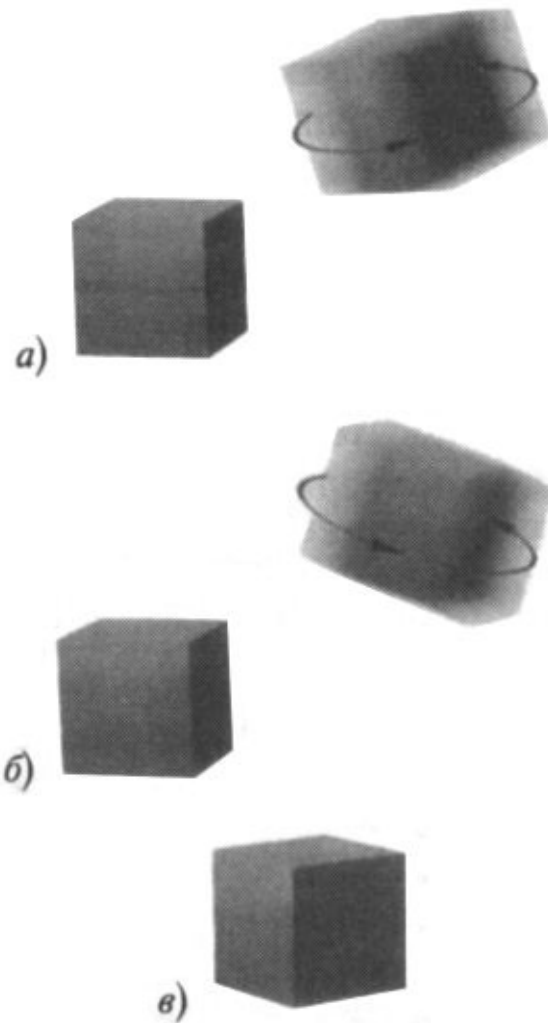


Рис. 8.1. Если куб, такой как на (а), поворачивать на 90° один или несколько раз относительно осей, проходящих через любую из его граней, он выглядит не изменившимся, как на (б). Но любые другие вращения можно заметить (в)

Всё это примеры симметрий объектов в пространстве. Симметрии, лежащие в основе известных законов физики, тесно связаны с этими симметриями, но сконцентрируемся на более абстрактном вопросе: какие манипуляции — реальные или воображаемые — могут быть проделаны над вами или над окружающей средой, такие что они совершенно не будут влиять на законы, которые описывают наблюдаемые вами физические явления? Отметим, что для того чтобы быть симметриями, преобразования не обязательно должны оставлять ваши наблюдения неизменными. Вместо этого мы интересуемся, изменяются ли законы, управляющие такими

наблюдениями, — остаются ли неизменными законы, которые объясняют, что вы видели до некоторых манипуляций, и законы, которые объясняют то, что вы видите после некоторых манипуляций. Поскольку это центральная идея, рассмотрим её в действии на некоторых примерах.

Представьте себе, что вы олимпийский гимнаст и в течение последних четырёх лет вы старательно тренировались в вашем гимнастическом центре в Коннектикуте. Постоянными повторениями вы довели каждое движение вашей программы до совершенства — вы знаете точно, как сильно надо оттолкнуться от перекладины для выполнения соскока, как высоко надо подпрыгнуть в упражнении на ковре для выхода с двойным пируэтом, как быстро надо крутануться на брусьях, чтобы запустить ваше тело в восхитительный соскок с двойным кульбитом. В сущности, вашему телу присуще врождённое чувство законов Ньютона, поскольку это именно те законы, которые управляют движением вашего тела. Теперь, когда вы, наконец, выполняете упражнения перед переполненным залом в Нью-Йорке, месте проведения олимпийских состязаний, вы рассчитываете, что будут выполняться те же самые законы, поэтому вы планируете выполнить ваши упражнения в точности так, как на тренировке. Всё, что мы знаем о законах Ньютона, заставляет вас верить в свою стратегию. Законы Ньютона не зависят от местоположения. Они не действуют по-разному в Коннектикуте и в Нью-Йорке. Наоборот, мы верим, что эти законы работают в точности одинаково вне зависимости от того, где вы находитесь. Даже если вы измените местоположение, законы, которые управляют движением вашего тела, останутся неизменными, как это было с внешним видом поворачивающегося бильярдного шара.

Эта симметрия известна как *трансляционная симметрия* или *трансляционная инвариантность*. Она применима не только к законам Ньютона, но также и к законам электромагнетизма Максвелла, к специальной и общей теориям относительности Эйнштейна, к квантовой механике и к любому серьёзному утверждению современной физики.

Тем не менее отметим один важный момент. Ваши наблюдения и ощущения могут и иногда будут изменяться в зависимости от местоположения. Если вы будете выполнять гимнастические упражнения на Луне, то обнаружите, что высота прыжка в ответ на ту же силу толчка будет совсем другой. Но мы вполне понимаем это частное отличие, и оно уже встроено в сами законы. Луна менее массивна, чем Земля, поэтому на ней действует меньшее гравитационное притяжение; в итоге ваше тело движется по другой траектории. И этот факт — что гравитационное притяжение тела зависит от его массы — является составной частью

ньютоновского закона гравитации (так же как и составной частью более точной общей теории относительности Эйнштейна). Разница между вашими земными и лунными ощущениями не означает, что закон гравитации изменился из-за местоположения. В действительности, эта разница просто отражает отличия окружающей среды, с которыми закон гравитации уже согласован. Итак, когда мы говорим, что известные законы физики одинаково применимы в Коннектикуте или в Нью-Йорке (или на Луне), это будет верно, но помните, что может потребоваться учёт отличий в окружающей среде. Тем не менее, и это ключевое заключение, обеспечиваемая законами природы система объяснений совершенно не меняется при изменении местоположения. Изменение в местоположении не требует от физика возврата к грифельной доске для вывода новых законов.

Законы физики не обязаны действовать таким образом. Мы можем представить Вселенную, в которой физические законы меняются так же, как местные и национальные правительства; мы можем представить Вселенную, в которой законы физики, с которыми мы обычно имеем дело, ничего не говорят о законах физики на Луне, в галактике Андромеды, в Крабовидной туманности или на другом конце Вселенной. Фактически, мы не можем быть абсолютно уверены, что законы, которые работают здесь, являются теми же, которые работают в дальних уголках космоса. Но мы знаем, что если законы каким-то образом и отличаются, то это должно происходить где-то *очень* далеко, так как всё более точные астрономические наблюдения обеспечивают всё более убедительные свидетельства в пользу того, что законы однородны в пространстве, по крайней мере в видимом нами пространстве. Это показывает поразительную силу симметрии. Мы связаны с планетой Земля и её окрестностями. И всё же, благодаря трансляционной симметрии мы можем, не покидая дома, получить знания о фундаментальных законах, работающих во всей Вселенной, поскольку законы, которые мы открываем здесь, являются законами и *там*.

Вращательная симметрия, или вращательная инвариантность, является близкой родственницей трансляционной инвариантности. Она основывается на идее, что каждое пространственное направление равноправно с любым другим. Вид с Земли определённо не приводит вас к такому заключению. Когда вы смотрите вверх, вы видите вещи, очень отличающиеся от тех, что вы видите внизу. Но, опять, это отражает детали окружения; это не характеризует фундаментальные законы сами по себе. Если вы покинули Землю и плаваете в пустом пространстве, далеко от любых звёзд, галактик или иных небесных тел, симметрия становится

очевидной: там нет ничего, что отличило бы одно частное направление в чёрной пустоте от другого. Они все равноправны. Вы даже не станете задумываться, в каком положении должна находиться в глубоком космосе лаборатория, созданная для исследования свойств материи или сил, поскольку основополагающие законы нечувствительны к такому выбору. Если однажды ночью некий шутник изменит установки лабораторных гироскопов, вынудив их повернуться на некоторое число градусов относительно некоторой специальной оси, можно ожидать, что это не будет иметь каких-либо следствий для законов физики, изучаемых вашими экспериментами. Каждое измерение будет подтверждать это ожидание. Таким образом, мы уверены, что законы, которые управляют вашими экспериментами и объясняют найденные результаты, нечувствительны к вашему местоположению (это трансляционная симметрия), а также к тому, как вы сориентированы в пространстве (это вращательная симметрия).^[101]

Как мы обсуждали в главе 3, Галилей и другие были хорошо осведомлены и о другой симметрии, которую должны соблюдать законы физики. Если ваша удалённая в пространстве лаборатория движется с постоянной скоростью — не имеет значения, двигаетесь ли вы со скоростью 5 км/ч туда или 100 000 км/ч сюда, — движение абсолютно не должно влиять на законы, которые объясняют ваши наблюдения, поскольку вы так же правы, как и ваш сосед, утверждая, что покоитесь вы, а движется что-то другое. Как мы видели, Эйнштейн расширил эту симметрию совершенно неожиданным образом, включив скорость света в число наблюдений, которые не зависят ни от вашего движения, ни от движения источника света. Это был ошеломляющий ход, поскольку мы обычно считаем информацию о скорости объекта второстепенными деталями окружения, полагая, что в общем случае наблюдаемая скорость зависит от движения наблюдателя. Но Эйнштейн, различая сияние симметрии сквозь трещины фасада ньютоновской природы, вознёс скорость света на уровень несокрушимого закона природы, объявив её независимой от движения, как вид бильярдного шара не зависит от его поворотов.

Общая теория относительности, следующее великое открытие Эйнштейна, встала на путь теорий с ещё большей симметрией. Точно так, как вы можете думать о специальной теории относительности как о теории, устанавливающей симметрию среди всех наблюдателей, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью, вы можете думать об общей теории относительности как о теории, идущей на шаг дальше и устанавливающей симметрию также и среди всех ускоренных систем отсчёта. Это экстраординарно, поскольку, как мы подчёркивали, хотя вы и

не можете чувствовать движение с постоянной скоростью, но вы *можете* почувствовать ускоренное движение. Может показаться, что законы физики, описывающие ваши наблюдения, должны непременно изменяться при ускорении, чтобы оценить добавочные силы, которые вы чувствуете. Это так в случае ньютоновского подхода; его законы — это первое, что появляется во всех учебниках по физике для первого года обучения, и они должны быть изменены, если используются ускоренным наблюдателем. Но благодаря принципу эквивалентности, который обсуждался в главе 3, Эйнштейн осознал, что силы, ощущаемые при ускоренном движении, неотличимы от сил, которые вы чувствуете в гравитационном поле подходящей интенсивности (чем больше ускорение, тем больше гравитационное поле). Так что в соответствии с эйнштейновской, более тонкой точкой зрения, когда вы ускоряетесь, законы физики не изменяются, коль скоро вы включаете подходящее гравитационное поле в описание окружения. Общая теория относительности рассматривает всех наблюдателей, даже тех, которые двигаются с произвольной переменной скоростью, одинаково, — они полностью симметричны, — поскольку каждый может утверждать, что он покоится при условии отнесения различных сил, которые он чувствует, к влиянию различных гравитационных полей. Различия в наблюдениях различных ускоренных наблюдателей, следовательно, более не являются удивительными и говорят об изменении законов природы не больше, чем отличия при выполнении гимнастических упражнений на Земле или на Луне. ^{102}

Эти примеры дают некоторое представление, почему многие считают (и, я думаю, Фейнман согласился бы с ними), что многочисленные симметрии, лежащие в основании законов природы, занимают (с минимальным отрывом) второе место вслед за атомной гипотезой в списке наших наиболее глубоких научных достижений. Но это ещё не всё. В течение последних нескольких десятилетий физики подняли принципы симметрии на самую верхнюю ступеньку лестницы научных объяснений. Когда вы сталкиваетесь с возможным законом природы, естественные вопросы, которые должны быть заданы, таковы: почему этот закон? почему специальная теория относительности? почему общая теория относительности? почему максвелловская теория электромагнетизма? почему теория Янга–Миллса сильных и слабых ядерных сил (которую мы коротко рассмотрим)? Один важный ответ состоит в том, что эти теории дают предсказания, которые раз за разом подтверждаются точными экспериментами. Это существенно для доверия, которое физики испытывают к этим теориям, но за кадром остаётся нечто важное.

Физики также верят этим теориям, потому что в некотором трудно объяснимом смысле они это непосредственно *ощущают*, и идея симметрии существенна для этого ощущения. Непосредственно ощущается, что во Вселенной нет места, которое как-то специально выделено по сравнению с любым другим, поэтому физики доверяют утверждению, что трансляционная симметрия должна быть среди симметрий законов природы. Непосредственно ощущается, что нет выделенного движения с постоянной скоростью, поэтому физики доверяют утверждению, что специальная теория относительности, полностью отражая симметрию между всеми наблюдателями, движущимися с постоянной скоростью, является существенной частью законов природы. Более того, непосредственно ощущается, что любая точка отсчёта для наблюдения — независимо от её возможного ускоренного движения — должна быть так же применима, как и любая другая, так что физики верят, что общая теория относительности, простейшая теория, включающая эту симметрию, находится среди глубоких истин, управляющих природными явлениями. И, как мы скоро увидим, теории трёх сил, отличных от гравитации, — электромагнетизма, сильного и слабого ядерных взаимодействий — основываются на других, несколько более абстрактных, но равно убедительных принципах симметрии. Так что симметрии природы не являются просто следствиями законов природы. С нашей современной точки зрения симметрии являются почвой, из которой произрастают законы.

Симметрия и время

Кроме своей роли в определении характера законов, управляющих силами природы, идеи симметрии жизненно важны и для концепции самого времени. Никто пока не нашёл ясного, фундаментального определения времени, но, несомненно, часть роли времени в структуре космоса заключается в том, что оно является счетоводом изменений. Мы ощущаем, что время пролетело, замечаем, что вещи теперь отличаются от того, какими они были раньше. Часовая стрелка на часах указывает на другую цифру, солнце занимает на небе другое положение, страницы в переплетённом экземпляре книги «Война и мир» стали более перемешанными, углекислый газ, который вырвался из бутылки колы, занял больший объём, — всё это говорит о том, что вещи изменились, и время есть то, что обеспечивает возможность осуществления таких

изменений. Перефразируя Джона Уилера, время есть способ природы удержания всего — т. е. всех изменений — так, чтобы всё не произошло сразу.

Таким образом, существование времени связано с *отсутствием* определённой симметрии: вещи во Вселенной должны изменяться от момента к моменту, для того чтобы мы вообще могли определить понятие *от момента к моменту*, которое как-то представляет наше интуитивное представление времени. Если имеется полная симметрия между существующим положением вещей, и тем, что было, и изменения от момента к моменту имеют не больше последствий, чем изменения при повороте бильярдного шара, время, в нашем обычном представлении, не могло бы существовать.^{103} Это не означает, что экспансия пространства-времени, схематически показанная на рис. 5.1, не могла бы существовать — она могла бы. Но, поскольку вдоль оси времени всё было бы совершенно однородно, не было бы никакого смысла, в котором Вселенная эволюционирует или изменяется. Время было бы абстрактным свойством такой арены реальности — четвёртым измерением в пространственно-временном континууме, — но, с другой стороны, оно было бы нераспознаваемым.

Тем не менее, хотя существование времени равнозначно отсутствию некоторой определённой симметрии, его применение в космических масштабах требует от Вселенной уважительно относиться к другой симметрии. Идея проста и отвечает на вопрос, который мог появиться у вас при чтении главы 3. Если теория относительности учит нас, что течение времени зависит от того, как быстро вы двигаетесь, и от гравитационного поля, в котором вы находитесь, тогда что должны означать слова астрономов и физиков о всей Вселенной, имеющей определённый возраст — возраст, который в наши дни оценивается приблизительно в 14 млрд лет? 14 млрд лет по отношению к кому? 14 млрд лет по каким часам? Придут ли существа, живущие в далёкой галактике Головастика, к заключению, что Вселенной 14 млрд лет, и если так, что будет гарантировать, что их часы тикают синхронно нашим? Ответ связан с симметрией — симметрией в пространстве.

Если бы ваши глаза могли видеть свет, длина волны которого значительно больше, чем у оранжевого или красного света, вы могли бы не только видеть внутренности вашей микроволновой печи в момент её включения, но также видели бы слабое и почти однородное зарево на том, что мы воспринимаем как тёмное ночное небо. Более сорока лет назад учёные открыли, что Вселенная наполнена микроволновым излучением —

светом с большой длиной волны, — которое является холодным остатком жарких условий сразу после Большого взрыва.^{104} Это *космическое микроволновое фоновое излучение* совершенно безопасно. Раньше оно было значительно горячее, но в ходе эволюции и расширения Вселенной плотность излучения постепенно снижалась и температура падала. Сегодня его температура составляет всего около $2,7^{\circ}$ выше абсолютного нуля, и самое заметное его проявление в качестве источника неприятностей заключается в его вкладе в небольшую часть «снега», который вы видите по телевизору при отключённом кабеле или при настройке на канал, по которому не ведётся вещание.

Но эти слабые радиопомехи дают астрономам то же, что кости тираннозавров дают палеонтологам: окно в ранние эпохи, которое играет ключевую роль в реконструкции того, что происходило в удалённом прошлом. Существенное свойство излучения, обнаруженное точными спутниковыми измерениями на протяжении последнего десятилетия, состоит в том, что оно предельно однородно. Температура излучения в одной части неба отличается от температуры в другой части неба менее чем на тысячную долю градуса. На земле такая симметрия сделала бы телевизионные каналы с прогнозом погоды неинтересными. Если в Джакарте 30°C , вы бы знали наверняка, что в Аделаиде, Шанхае, Кливленде, Анкоридже и где угодно температура будет между $29,999^{\circ}\text{C}$ и $30,001^{\circ}\text{C}$. Наоборот, в космических масштабах однородность температуры излучения *чрезвычайно* интересна, так как она позволяет прийти к двум очень важным выводам.

Во-первых, она обеспечивает наблюдательное свидетельство того, что на ранних этапах развития Вселенная не была заполнена большими и тяжёлыми высокоэнтропийными скоплениями материи, такими как чёрные дыры, поскольку такая неоднородная среда должна была бы оставить отпечаток неоднородности и на излучении. Наоборот, однородность температуры излучения подтверждает, что молодая Вселенная была однородной; и, как мы видели в главе 6, однородность означает низкую энтропию, если гравитация играет важную роль, — как это и было в ранней плотной Вселенной. И это хорошо, поскольку наше обсуждение стрелы времени существенно опиралось на то, что Вселенная стартовала с низкой энтропией. Продвинуться в объяснении этого наблюдения как можно дальше — это одна из наших целей в этой части книги. Мы хотим понять, как могло возникнуть однородное, низкоэнтропийное и очень маловероятное, состояние ранней Вселенной. Это позволит нам сделать большой шаг к пониманию причин стрелы времени.

Во-вторых, хотя Вселенная эволюционировала после Большого взрыва, в среднем эволюция должна была быть почти одинаковой в разных местах космоса. Ввиду того что температуры здесь, и в галактике Водоворот, и в скоплении галактик Волосы Вероники, и где угодно ещё согласуются с точностью до четвёртого знака после запятой, физические условия в каждой области пространства должны изменяться после Большого взрыва существенно одинаковым образом. Это важный вывод, но нужно правильно его интерпретировать. Взгляд на ночное небо определённо показывает разнообразие космоса: различные планеты и звёзды разбросаны там и тут по пространству. Суть, однако, в том, что когда мы анализируем эволюцию целой Вселенной, мы рассматриваем макроскопическую перспективу, которая получается усреднением по этим «мелкомасштабным» отклонениям, и крупномасштабные средние оказываются почти совершенно однородными. Представьте себе стакан воды. В масштабе молекул вода в высшей степени неоднородна: здесь имеется молекула H_2O , затем пустое пространство, затем другая молекула H_2O и т. д. Но если мы усредним по мелкомасштабной молекулярной неоднородности и исследуем воду в «больших», повседневных масштабах, мы можем увидеть невооружённым глазом, что вода в стакане выглядит совершенно однородной. Неоднородность, которую мы видим, глядя на небо, подобна микроскопическому виду на отдельные молекулы H_2O . Но, как и в случае стакана воды, когда Вселенная изучается в достаточно больших масштабах, — масштабах порядка сотен миллионов световых лет, [52] — она становится предельно однородной. Таким образом, однородность излучения является «ископаемым» свидетельством однородности как законов физики, так и деталей среды везде в космосе.

Это заключение является весьма примечательным, поскольку однородность Вселенной позволяет определить концепцию времени, применимую для Вселенной как целого. Если мы принимаем меру изменений в качестве рабочего определения истёкшего времени, то однородность условий везде в пространстве является свидетельством однородности изменений везде в космосе, что предполагает также и однородность прошедшего времени. Точно так же, как однородность земной геологической структуры позволяет геологу в Америке, и такому же геологу в Африке, и другому в Азии прийти к согласию относительно возраста земной истории, однородность космической эволюции всюду в пространстве позволяет физику в галактике Млечного Пути, и такому же физику в галактике Андромеды и другому в галактике Головастика прийти

в целом к согласию по поводу возраста и истории Вселенной. Конкретно, однородная эволюция Вселенной означает, что часы здесь, часы в галактике Андромеды и часы в галактике Головастика будут в среднем отсчитывать время примерно одинаковым образом. Таким образом, однородность пространства обеспечивает универсальную синхронизацию.

Поскольку я отложил важные детали (такие как расширение пространства, освещаемое в следующем разделе), выделим ядро проблемы: время располагается на перепутье симметрии. Если Вселенная имеет абсолютную временную симметрию — если она совершенно не меняется, — было бы трудно определить даже, что время означает. С другой стороны, если Вселенная не имеет симметрии в пространстве — если, например, фоновое излучение было бы совершенно случайным, имея сильно различающуюся температуру в разных областях, — время с космологической точки зрения имело бы мало смысла. Часы в разных местах отсчитывали бы время с разной скоростью, так что, если бы вы спросили, что было, когда возраст Вселенной составлял 3 млрд лет, ответ зависел бы от того, по чьим часам вы отмеряете эти 3 млрд лет. Вот тогда было бы *сложно*. К счастью, наша Вселенная не имеет столько симметрии, чтобы сделать время бессмысленным, но имеет достаточно симметрии, чтобы мы могли избежать таких сложностей, позволяя нам говорить о её общем возрасте и её общей эволюции во времени.

Итак, теперь обратим внимание на эту эволюцию и рассмотрим историю Вселенной.

Растяжение ткани

История Вселенной звучит как нечто грандиозное, но в рамках грубого, эскизного наброска является неожиданно простой и зависит по большому счёту всего от одного существенного факта: *Вселенная расширяется*. Поскольку это является *самым* центральным элементом космической истории и, несомненно, вообще является одним из наиболее глубоких открытий, сделанных когда-либо, рассмотрим прежде, как это стало известно.

В 1929 г. Эдвин Хаббл, используя 100-дюймовый телескоп в обсерватории Маунт-Вильсон в Пасадене, штат Калифорния, обнаружил, что пара дюжин галактик, которые он смог обнаружить, все разбегаются в стороны.^{[105](#)} Фактически Хаббл выяснил, что чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется. Чтобы дать представление о величинах, заметим,

что более полные версии оригинальных наблюдений Хаббла (изучались тысячи галактик, в том числе с использованием космического телескопа «Хаббл») показывают, что галактики, которые удалены от нас на 100 млн световых лет, удаляются со скоростью около 10,2 млн км/ч, те же, до которых 200 млн световых лет, удаляются в два раза быстрее, около 20,4 млн км/ч, а те, до которых 300 млн световых лет, улетают в три раза быстрее, около 30,6 млн км/ч, и т. д. Открытие Хаббла было шокирующим, поскольку господствовавшие научные и философские убеждения состояли в том, что Вселенная, в большом масштабе, должна быть статической, вечной и неизменной. Но Хаббл одним ударом вдребезги разбил эту точку зрения. И в поразительном соответствии теории и эксперимента, общая теория относительности Эйнштейна оказалась способной обеспечить прекрасное объяснение открытия Хаббла.

Действительно, не нужно думать, что получить объяснение слишком сложно. В конце концов, если вы, проходя мимо завода, вдруг увидите, что во все стороны от него летят различные материалы, то вероятно подумаете, что на заводе что-то взорвалось. Если вы проследите назад по времени пути металлических кусков и бетонных блоков, вы найдёте, что все они сходятся в месте, которое является вероятным кандидатом на место взрыва. По тем же самым причинам, поскольку вид с Земли — как свидетельствуют наблюдения Хаббла и последующие — показывает, что галактики разлетаются, вы можете подумать, что наше положение в пространстве было местом древнего взрыва, который однородно разбросал исходный материал звёзд и галактик. Проблема с этой теорией в том, что она выделяет одну область в пространстве — нашу область — как уникальную, поскольку делает её местом рождения Вселенной. Будь так, это повлекло бы за собой глубокую асимметрию: физические условия в областях, удалённых от изначального взрыва — удалённых от нас, — сильно отличались бы от условий здесь. Поскольку в астрономических данных нет подтверждения такой асимметрии и, более того, поскольку мы с большим подозрением относимся к антропоцентрическим объяснениям, замешанным на докоперниковском мышлении, требуется более изощрённая интерпретация открытия Хаббла, в которой наше положение не занимает выделенного места в космосе.

Общая теория относительности обеспечивает такую интерпретацию. В этой теории Эйнштейн выяснил, что пространство и время являются подвижными и растяжимыми, а не жёсткими и раз и навсегда фиксированными; и он дал уравнения, которые точно говорят, как пространство и время откликаются на присутствие материи и энергии. В

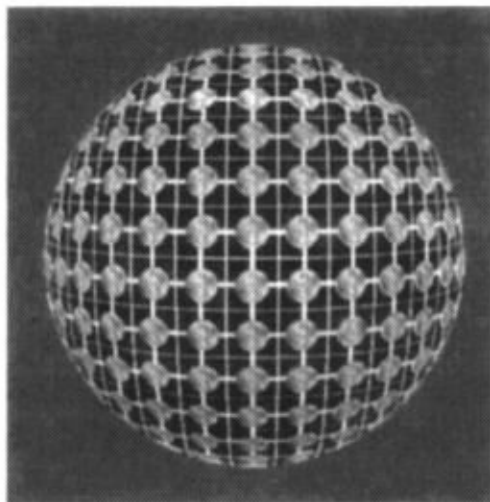
1920-е гг. русский математик и метеоролог Александр Фридман и бельгийский священник и астроном Жорж Леметр независимо проанализировали уравнения Эйнштейна применительно ко всей Вселенной, и оба нашли нечто поразительное. Точно так же, как из-за гравитационного притяжения Земли бейсбольный мяч, запущенный кетчером свечой вверх, должен либо двигаться вверх, либо падать вниз, но, определённо, не может стоять на месте (исключая одно мгновение, когда он достигает своей высшей точки), так и Фридман и Леметр обнаружили, что из-за гравитационного притяжения материи и излучения, распространяющегося по всему космосу, ткань пространства должна либо растягиваться, либо сжиматься, но что она не может сохранять фиксированного размера. Фактически, это один из редких примеров, в которых метафора схватывает не только суть физики, но также и её математическое содержание, поскольку, как оказалось, уравнения, управляющие высотой полёта бейсбольного мяча над землёй, почти идентичны уравнениям Эйнштейна, управляющим размером Вселенной.

[{106}](#)

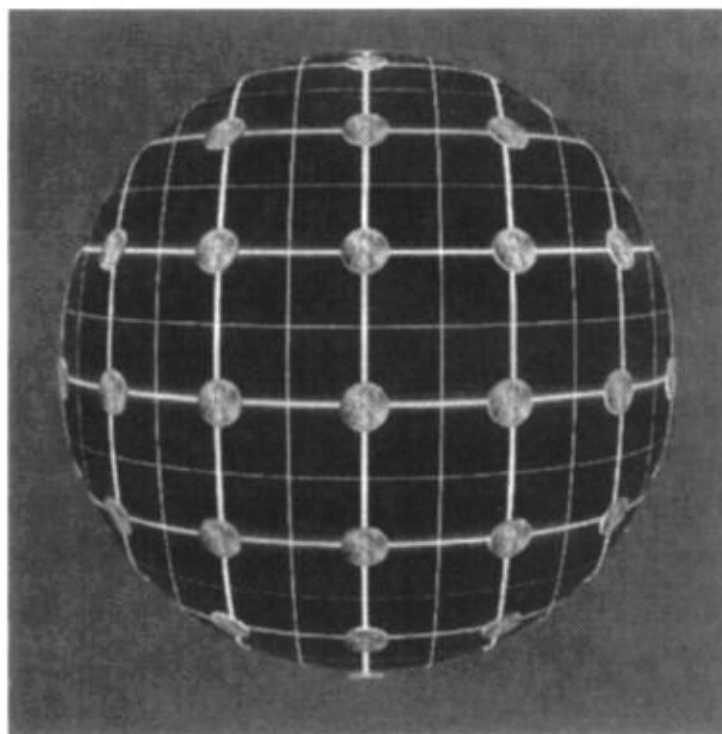
Подвижность пространства в общей теории относительности даёт способ для глубокого объяснения открытия Хаббла. Вместо того чтобы объяснять разбегание галактик космической версией взрыва на заводе, общая теория относительности говорит, что в течение миллиардов лет пространство растягивается. И по мере разбухания пространство растаскивает галактики друг от друга, подобно тому как чёрные пятнышки на посыпанном маком пироге удаляются друг от друга, когда тесто поднимается в печи. Так что причина движения галактик в разные стороны *не* во взрыве, который имел место внутри пространства. Нет, движение в разные стороны возникает из непрекращающегося растяжения самого пространства.

Чтобы лучше ухватить эту ключевую идею, подумаем также о чрезвычайно полезной модели расширяющейся Вселенной в виде воздушного шара, которую часто используют физики (аналогия, столь же давняя, как весёлая карикатура, которую вы можете увидеть в примечании [{107}](#) и которая появилась в голландской газете в 1930 г. после интервью с Виллемом де Ситтером, учёным, который внёс большой вклад в космологию). Эта аналогия уподобляет наше трёхмерное пространство двумерной поверхности сферического воздушного шара (как на рис. 8.2a), который раздувается до всё большего и большего размера. Галактики представлены многочисленными равномерно распределёнными монетками пенни с портретом Линкольна, приклеенными к поверхности шара. Так как

шар раздувается, все монетки удаляются друг от друга, обеспечивая простую аналогию того, как расширяющееся пространство разносит галактики.



a)



б)

Рис. 8.2. (а) Если равномерно распределённые монетки приклеены к поверхности сферы, вид, который увидит один

Линкольн, изображённый на монетке, будет таким же, который увидит любой другой. Это соответствует тому, что вид из любой галактики во Вселенной в среднем будет таким же, как из любой другой. (б) Если сфера раздувается, расстояния между всеми монетками увеличиваются. Более того, чем дальше монетки друг от друга разнесены на (а), тем больше увеличится между ними расстояние на (б). Это хорошо согласуется с измерениями, которые показывают, что чем более удалена от данной точки отсчёта галактика, тем быстрее она удаляется от этой точки. Отметим, что ни одна монетка не была выделена как специальная, что также согласуется с нашей уверенностью, что во Вселенной ни одна галактика не является как-то выделенной или центром расширения пространства

Важная особенность этой модели состоит в том, что имеется полная симметрия монеток, поскольку вид, который наблюдает какой-либо отдельно взятый Линкольн, будет таким же, как и вид, который наблюдает любой другой Линкольн. Чтобы показать это, представьте, что вы уменьшились, попали на монетку и обзываете все направления вдоль поверхности шара (вспомним, что в этой аналогии поверхность шара представляет всё пространство, так что взгляд не вдоль поверхности шара лишён смысла). Что вы будете видеть? Конечно, вы увидите монетки, удаляющиеся от вас во всех направлениях, так как шар раздувается. А если вы перейдёте на другую монетку, что вы будете наблюдать? Симметрия гарантирует, что вы будете видеть то же самое: монетки, разбегающиеся во всех направлениях. Этот осязаемый образ хорошо подкрепляет наши убеждения — при поддержке всё более точных астрономических исследований, — что наблюдатель в любой из более чем 100 млрд галактик Вселенной, вглядывающийся в своё ночное небо через мощный телескоп, будет в среднем видеть образ, сходный с тем, что видим мы: окружающие галактики, удаляющиеся прочь во всех направлениях.

Итак, в отличие от взрыва на заводе внутри фиксированного заранее и уже существующего пространства, в рассматриваемой ситуации движение в разные стороны возникает вследствие того, что само пространство растягивается, поэтому не нужна выделенная точка — ни особая монетка, ни особая галактика, — являющаяся центром расходящегося движения. Каждая точка — каждая монетка, каждая галактика — выступает абсолютно наравне с любой другой. Вид из любого места *кажется* похожим на вид из центра взрыва: каждый Линкольн видит всех других

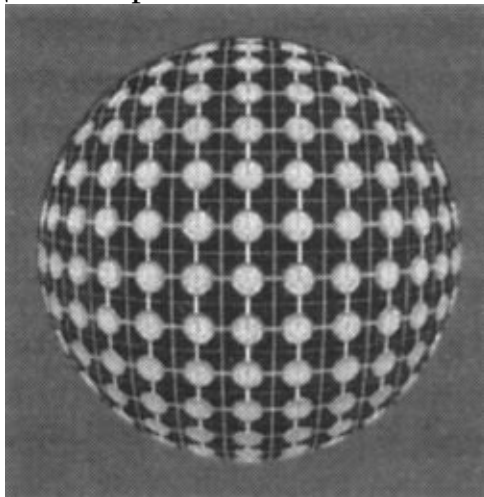
Линкольнов удаляющимися прочь; наблюдатель, вроде нас, в любой галактике видит все другие галактики разбегающимися. Но поскольку это верно для всех положений, не существует специального или уникального места, которое было бы центром, из которого происходит расходящееся движение.

Более того, эта картина не только качественно объясняет такое разбегание галактик, которое является пространственно однородным, но она также объясняет количественные детали, обнаруженные Хабблом и подтверждённые с большей точностью последующими наблюдениями. Как видно из рис. 8.2б, если воздушный шар раздувается в течение некоторого интервала времени, например, удваиваясь в размере, то все пространственные расстояния будут также удвоены: монетки, которые находились на расстоянии 1 дюйм, теперь будут на расстоянии 2 дюйма, монетки, которые находились на расстоянии 2 дюйма, теперь будут на расстоянии 4 дюйма, монетки, которые находились на расстоянии 3 дюйма, теперь будут на расстоянии 6 дюймов и т. д. Так что в течение любого заданного промежутка времени увеличение расстояний между двумя монетками пропорционально начальному расстоянию между ними. А поскольку большее увеличение расстояния за данный промежуток времени означает большую скорость, монетки, которые удалены дальше друг от друга, разлетаются быстрее. В сущности, чем дальше находятся друг от друга две монетки, тем больше поверхности воздушного шара находится между ними и тем быстрее они разлетаются в стороны, когда шар раздувается. Применяя точно такие же рассуждения к пространству и содержащимся в нём галактикам, мы получаем объяснение наблюдений Хаббла. Чем дальше находятся две галактики, тем больше пространства имеется между ними, и тем быстрее они будут разлетаться друг от друга при расширении пространства.

Связывая наблюдаемое движение галактик с расширением пространства, общая теория относительности даёт объяснение, которое не только трактует все положения в пространстве симметрично, но также одним махом объясняет все результаты Хаббла. Это объяснение, в котором преодолевается исключительность нашего положения во Вселенной, решает задачу настолько элегантно, утончённо симметрично и с количественной точностью, что физики рассматривают его как слишком красивое, чтобы быть неверным. В настоящее время имеется практически полное общее согласие в том, что ткань пространства растягивается.

Время в расширяющейся Вселенной

Используя небольшую вариацию модели воздушного шара, теперь можно более точно понять, как симметрия пространства, хотя пространство и расширяется, приводит к понятию времени, которое одинаково применимо в любом месте космоса. Представьте, что мы заменяем каждую монетку одинаковыми часами, как на рис. 8.3. Из теории относительности мы знаем, что при наличии различных физических воздействий — движения или различных гравитационных полей, одинаковые часы отсчитывают время с различным темпом. Но простое, хотя и ключевое, наблюдение заключается в том, что полная симметрия среди всех Линкольнов на раздувающемся шаре переносится на полную симметрию среди всех часов. Все часы помещены в одинаковые физические условия, так что все тикают в точности с одинаковым темпом и фиксируют одинаковое количество прошедшего времени. Аналогично, в расширяющейся Вселенной, в которой имеется высокая степень симметрии среди всех галактик, часы, которые двигаются вместе с той или иной галактикой, также должны тикать с одинаковым темпом и, следовательно, фиксировать одинаковое количество истёкшего времени. Как может быть иначе? Каждые часы выступают наравне с любыми другими, находясь в среднем примерно в одинаковых физических условиях. Это снова показывает ошеломляющую силу симметрии. Без каких-либо расчётов или детального анализа мы выяснили, что однородность физического пространства, как это подтверждается однородностью микроволнового фонового излучения и однородным распределением галактик в пространстве,^{[108](#)} позволяет сделать заключение об однородности времени.



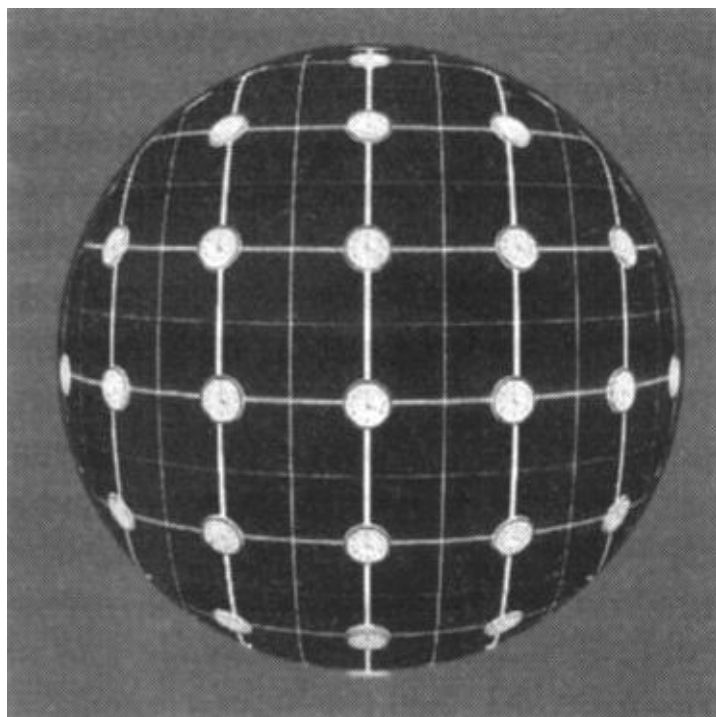


Рис. 8.3. Часы, которые двигаются вместе с галактиками — чьё движение в среднем возникает только благодаря расширению пространства — обеспечивают универсальный космический хронометраж. Они остаются синхронизированными, хотя отделены друг от друга, поскольку они двигаются *вместе* с пространством, но не *через* пространство

И хотя данное обоснование довольно прозрачно, тем не менее заключение может сбить с толку. Поскольку все галактики разбегаются в разные стороны по мере расширения пространства, часы, которые двигаются вместе с галактиками, разбегаются вместе с ними. Более того, галактики двигаются друг относительно друга с гигантским разнообразием скоростей, определяемым гигантским разнообразием расстояний между ними. Не станет ли это движение причиной рассинхронизации часов, как нас учил Эйнштейн в специальной теории относительности? По ряду причин ответ — нет; вот один особенно полезный способ подумать над этим.

Вспомним из главы 3, что Эйнштейн установил, что часы, движущиеся через пространство различными способами, отсчитывают время с различными скоростями (поскольку они переводят различное количество их движения через время в движение через пространство; вспомните аналогию с Бартом на его скейтборде, сначаладвигающимся на север, а

затем переводящим некоторое количество своего движения на северо-восток). Но часы, которые мы сейчас обсуждаем, совсем *не* двигаются через пространство. Точно так же, как каждая монетка приклеена к одной точке воздушного шара и движется относительно других монет только вследствие раздувания поверхности шара, каждая галактика занимает одну область в пространстве и, большей частью, движется относительно других галактик только вследствие расширения пространства. А это значит, что по отношению к самому пространству все часы в действительности стационарны, так что они отсчитывают время идентично. Это именно те часы — *часы, движение которых происходит только в результате расширения пространства*, — которые обеспечивают синхронизацию космических часов, используемых для измерения возраста Вселенной.

Конечно, вы можете взять часы, прыгнуть на борт ракеты и носиться по пространству с такой громадной скоростью, что будете иметь существенное движение в дополнение к космическому потоку, связанному с расширением пространства. Если вы это сделаете, ваши часы будут идти с другой скоростью, и вы обнаружите другую продолжительность истёкшего после Большого взрыва времени. Это допустимая точка зрения, но она совершенно индивидуалистична: измеренное истёкшее время тесно связано с историей вашего специального местоположения и состояния движения. Когда астрономы говорят о возрасте Вселенной, они стремятся к чему-то универсальному — они стремятся измерить то, что имеет одинаковое значение где угодно. Однородность изменений всюду в пространстве даёт возможность это сделать. [\[109\]](#)

Фактически, однородность фонового микроволнового излучения обеспечивает готовый тест для определения соответствия вашего движения с космическим потоком пространства. Дело в том, что хотя микроволновое излучение и однородно в пространстве, но если вы предпримете дополнительное движение, не связанное с космическим потоком пространственного расширения, для вас излучение не будет однородным. [\[53\]](#) Точно так же, как гудок мчащегося автомобиля имеет бо́льшую высоту, когда автомобиль приближается, и меньшую высоту, когда автомобиль удаляется, если вы несётесь сквозь пространство на космическом корабле, пики и впадины микроволн, набегающие спереди на ваш корабль, будут иметь бо́льшую частоту, чем набегающие на корму. Более высокая частота микроволн переводится в более высокую температуру, так что вы обнаружите, что излучение в направлении вашего полёта будет чуть теплее, чем излучение, достигающее вас сзади. Оказывается здесь, на

«космическом корабле» Земля, астрономы действительно обнаруживают, что микроволновой фон немного теплее в одном направлении в пространстве и немного холоднее в противоположном направлении. Причина в том, что Земля не только движется вокруг Солнца, а Солнце движется вокруг галактического центра, но и вся наша Галактика (Млечный Путь) имеет небольшую скорость в дополнение к космическому расширению, направленную к звёздному скоплению Гидры. Только когда астрономы внесли поправки, связанные с влиянием этих относительно слабых дополнительных движений на микроволновой фон, мы выяснили, что микроволновое излучение проявляет высокую однородность температуры от одной части неба к другой. Это та однородность, та всеобъемлющая симметрия между различными положениями в пространстве, которая позволяет осмысленно говорить о времени при описании всей Вселенной.

Тонкие особенности расширяющейся Вселенной

Несколько тонких моментов нашего объяснения космического расширения достойны особого внимания. Во-первых, вспомним, что в аналогии с воздушным шаром роль играет только *поверхность* шара — поверхность, которая всего лишь двумерна (каждое положение может быть определено двумя числами, аналогичными широте и долготе на Земле), тогда как пространство, которое мы видим, имеет три измерения. Мы использовали эту модель с меньшим числом измерений, поскольку она сохраняет идеи, существенные для правильной, трёхмерной ситуации, но намного легче поддаётся визуализации. Важно иметь это в виду, особенно если вы попытаетесь сказать, что в модели воздушного шара *имеется* особая точка: центр шара, удаляясь от которого движется вся резиновая поверхность. Хотя это наблюдение верное, оно лишено смысла, поскольку любая точка вне поверхности шара не играет никакой роли в данной аналогии. Поверхность шара представляет собой *всё* пространство; точки, которые не лежат на поверхности шара, являются просто не относящимися к делу «побочными продуктами» модели и не соответствуют какому-либо положению во Вселенной.^[54]

Во-вторых, если для галактик, которые находятся всё дальше и дальше от нас, скорость удаления становится всё больше и больше, не означает ли это, что галактики, которые достаточно удалены, будут убегать от нас со скоростью большей, чем скорость света? Ответ ошеломляющий —

определённо да. Однако конфликта со специальной теорией относительности не возникает. Почему? А это тесно связано с причиной, по которой часы, разлетающиеся вместе с космическим потоком пространства, остаются синхронизированными. Как мы подчёркивали в главе 3, Эйнштейн установил, что ничто не может двигаться *через* пространство быстрее, чем свет. Но галактики в среднем двигаются через пространство еле-еле. Их движение едва ли не полностью связано с *растяжением самого пространства*. И теория Эйнштейна не запрещает пространству расширяться таким образом, что две точки — две галактики — удаляются друг от друга со скоростью большей, чем скорость света. Теория ограничивает только скорость, из которой удалена составляющая, связанная с пространственным расширением, скорость, дополнительную к пространственному расширению. Наблюдения подтверждают, что для типичных галактик, несущихся вместе с космическим потоком, такое превышение скорости является очень небольшим и полностью остаётся в рамках специальной теории относительности, хотя их движение относительно других галактик, возникающее из раздувания самого пространства, может превышать скорость света.^[55]

В-третьих, если пространство расширяется, не означает ли это, что в дополнение к тому, что галактики разлетаются друг от друга, раздувающееся пространство внутри каждой галактики будет двигать друг от друга все её звёзды, а раздувающееся пространство внутри каждой звезды, внутри каждой планеты и внутри вас, меня и чего угодно другого будет раздвигать все составляющие атомы? Короче, не заставит ли раздувающееся пространство любую вещь, включая наши мерные линейки, увеличивать размеры и, таким образом, сделает невозможным определение самого расширения? Ответ: нет. Подумайте ещё раз о модели воздушного шара с монетками. Поскольку поверхность воздушного шара раздувается, все монетки двигаются в разные стороны, но сами монетки, несомненно, не расширяются. Конечно, если вы представите галактики маленькими кружочками, нарисованным на шаре чёрным маркером, тогда действительно, по мере увеличения размера шара маленькие кружочки тоже будут расти. Но именно монетки, а не чёрные кружки дают понять, что реально происходит. Каждая монетка остаётся фиксированной по размеру, так как силы, удерживающие вместе её атомы цинка и меди, намного больше, чем растягивающие силы со стороны расширяющегося шара, к которому приклеена монетка. Аналогично, ядерные силы, удерживающие отдельные атомы как целое,^[56] электромагнитные силы,

удерживающие вместе ваши кости и кожу, гравитационные силы, удерживающие планеты и звёзды и собирающие их в галактики, более сильны, чем растаскивание за счёт раздувания пространства, так что ни один из этих объектов не расширяется. Только в самых больших масштабах, намного больше отдельных галактик, расширение пространства встречает мало сопротивления или не встречает совсем (гравитационное притяжение между сильно разделёнными галактиками относительно мало вследствие больших расстояний), так что лишь на таких сверхгалактических масштабах расширение пространства будет разносить объекты в стороны.

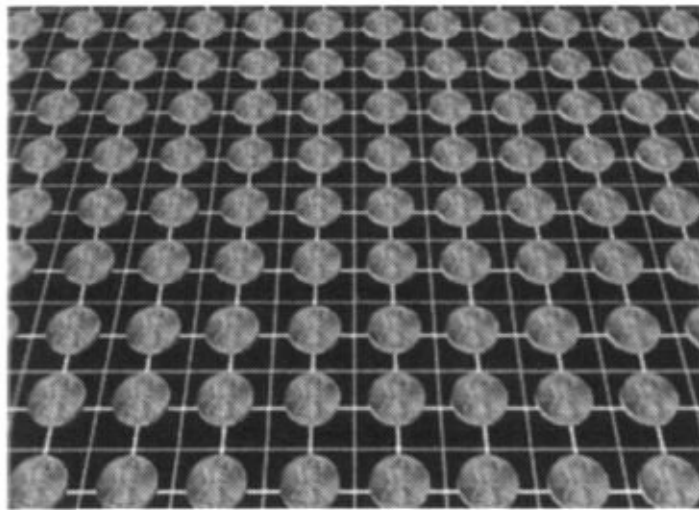
Космология, симметрия и форма пространства

Если кто-нибудь разбудит вас среди ночи и потребует рассказать о форме Вселенной — общей форме пространства, — вы, вероятно, затруднитесь с ответом. Даже в полусонном состоянии вы вспомните, что Эйнштейн показал, что пространство должно быть чем-то вроде пластилина, так что, в принципе, оно может иметь практически любую форму. Каким же тогда может быть возможный ответ? Мы живём на маленькой планете, вращающейся вокруг средней звезды на окраине Галактики, которая всего лишь одна из сотен миллиардов, рассеянных по пространству, так как же вы можете надеяться знать хоть что-нибудь о форме всей Вселенной? Но, когда туман сна рассеется, вы понемногу осознаете, что сила симметрии ещё раз придёт на помощь.

Если вы примете во внимание широко распространённое среди учёных мнение, что после крупномасштабного усреднения все местоположения и все направления Вселенной симметричны (равноправны) друг относительно друга, то вы на правильном пути к ответу на вопрос. Причина в том, что почти все формы пространства *не* удовлетворяют этому требованию симметрии, поскольку одна часть или одна область такого пространства фундаментально отличается от другой. Груша сильно выпукла у черенка, но куда меньше с противоположной стороны; яйцо более плоское в середине, но закруглённое у своих концов. Эти формы, хотя и проявляют некоторую степень симметрии, не обладают полной симметрией. Исключив такие формы и ограничившись только теми, в которых каждая область и направление похожи на любые другие, вы сможете значительно сократить список вариантов.

Мы уже сталкивались с одной формой, которая отвечает всем

требованиям. Сферическая форма воздушного шара была ключевым моментом в симметрии между монетками на его раздувающейся поверхности, и поэтому трёхмерная версия этой формы, так называемая 3-сфера, является одним из кандидатов на модель формы пространства. Но это не единственная форма, которая даёт полную симметрию. Продолжая работать с более лёгкими для визуализации двумерными моделями, представим *бесконечно* широкий и *бесконечно* длинный резиновый лист — абсолютно плоский — с равномерно распределёнными монетками, приклеенными к его поверхности. Если весь лист растягивается, то опять имеется полная пространственная симметрия и полное согласие с открытием Хаббла; каждый Линкольн на монетке видит, что каждый другой Линкольн удаляется со скоростью, пропорциональной расстоянию до него, как показано на рис. 8.4. Поэтому трёхмерная версия этой формы, подобная бесконечно протяжённому кубу из прозрачной резины с галактиками, равномерно разбросанными внутри, является другой возможной формой для пространства. (Если вы предпочитаете кулинарные аналогии, подумайте о бесконечно большом пироге с маком, который упоминался раньше, таком, который имеет форму куба, но продолжается бесконечно, при этом мак играет роль галактик. Когда пирог печётся, тесто поднимается, заставляя каждое маковое зерно удаляться от других). Эта форма называется плоским пространством, поскольку, в отличие от примера сферического пространства, она не имеет кривизны (понятие «плоский», которое используют математики и физики, отличается от разговорного понятия «подобный блину»).



a)

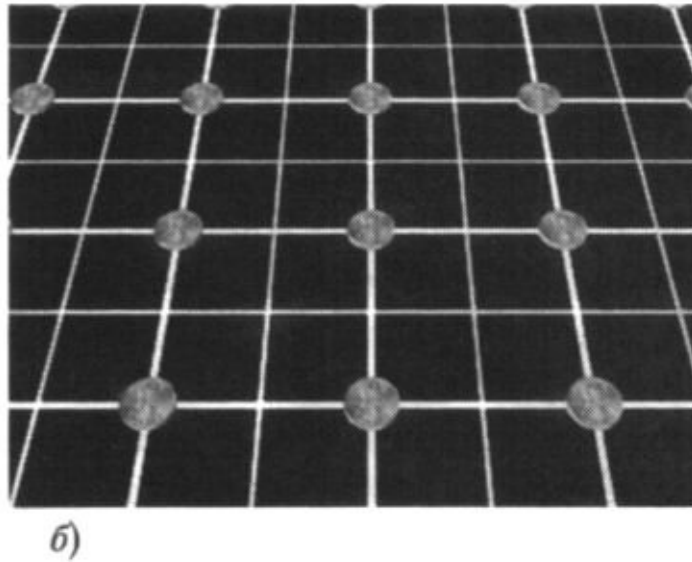
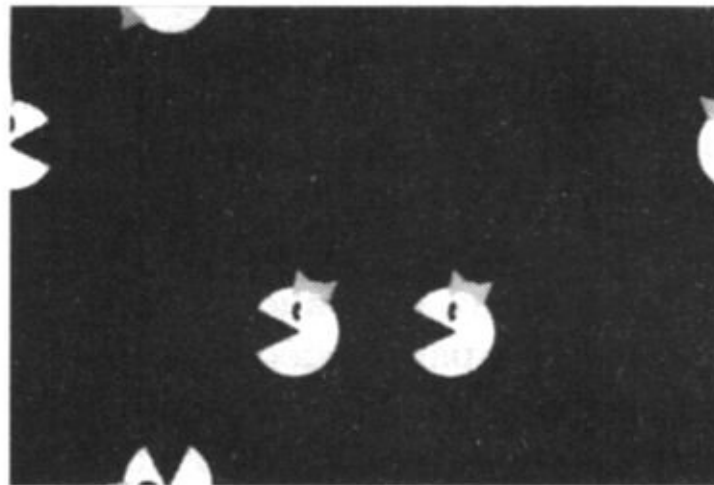


Рис. 8.4. (а) Вид от любой монетки на бесконечном плоском листе такой же, как и вид от любой другой монетки. (б) Чем дальше друг от друга расположены две монетки на (а), тем быстрее будет увеличиваться расстояние между ними при растяжении плоскости

Одно замечательное обстоятельство, имеющее отношение как к сферическому пространству, так и к бесконечному плоскому пространству, заключается в том, что вы можете бесконечно идти по нему и никогда не достигнете края или границы. Это удобно, поскольку позволяет избежать каверзных вопросов: что находится за краем пространства? что произойдёт, если вы дойдёте до границы пространства? Если пространство не имеет краёв или границ, вопрос не имеет смысла. Но заметим, что эти две формы обеспечивают это привлекательное свойство пространства различными способами. Если вы идёте прямо вперёд в сферическом пространстве, вы обнаружите, подобно Магеллану, что рано или поздно вернётесь в стартовую точку, нигде не встретив край. Наоборот, если вы идёте прямо вперёд по бесконечному плоскому пространству, то обнаружите, что, подобно кролику Энерджайзеру, можете идти и идти и никогда не дойдёте до края, но и не вернётесь туда, откуда начали путешествие. Хотя это может показаться фундаментальным отличием между геометрией искривлённого и плоского пространства, имеется простая вариация плоского пространства, которое делает его поразительно похожим в этом отношении на сферу.

Чтобы проиллюстрировать это, вспомним одну из тех видеоигр, в которых кажется, что экран имеет края, но на самом деле их нет, поскольку реально вы не можете покинуть пределы экрана: если вы пытаетесь выйти за правый край, вы снова появляетесь на левом; если вы выходите за верхний край, то снова появляетесь на нижнем. Экран «зациклен» путём отождествления верхнего края с нижним, а левого с правым, и, таким образом, форма пространства плоская (неискривлённая), но имеет *конечный* размер и не имеет краёв. Математически эта форма называется двумерным тором, она проиллюстрирована на рис. 8.5а.^[111] Трёхмерный вариант этой формы — трёхмерный тор — обеспечивает другую возможную форму для ткани космоса. Вы можете представить себе эту форму как гигантский куб, который зациклен вдоль всех трёх направлений: когда вы проходите через потолок, вы снова появляетесь снизу, когда вы проходите через заднюю стенку куба, вы снова появляетесь из передней стенки, когда вы проходите через левую сторону, вы снова появляетесь из правой, как показано на рис. 8.5б. Такая форма — плоская (в том смысле, что не искривлённая, а не в том смысле, что подобна блину), трёхмерная, конечная по всем направлениям и не имеет краёв и границ.



a)

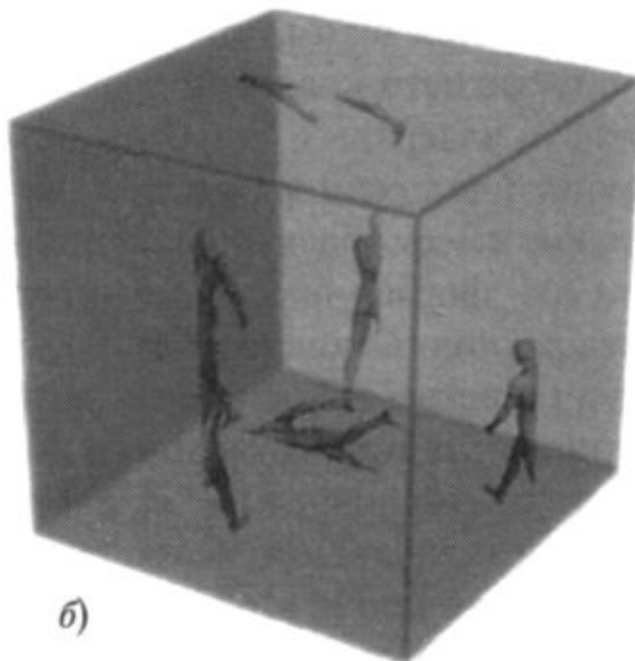


Рис. 8.5. (а) Экран видеоигры является плоским (в смысле «неискривлённым») и имеет конечный размер, но не содержит краёв или границ, поскольку он «зациклен». Математически такая форма называется *двумерным тором*. (б) Трёхмерная версия той же формы, называемая *трёхмерным тором*, также плоская (в смысле «неискривлённая»), имеет конечный объём и тоже не имеет краёв или границ, поскольку зациклена. Если вы проходите через одну сторону куба, вы входите через противоположную сторону

Помимо этих возможностей, остаётся ещё и другая форма, согласующаяся с объяснением открытия Хаббла с помощью симметричного расширяющегося пространства. Хотя это трудно изобразить в трёх измерениях, но, как и в примере сферического пространства, имеется хорошая двумерная модель: бесконечный вариант картофельного чипса «Принглс». Эта форма, часто обозначаемая как *седло*, является некоей противоположностью сферы: в то время как сфера симметрично выпукла наружу, седловина симметрично вогнута в себя, как показано на рис. 8.6. Используя немного математической терминологии, скажем, что сфера имеет *положительную кривизну* (выпукла наружу), седловина имеет *отрицательную кривизну* (вогнута в себя), а плоское пространство — как бесконечное, так и конечное — *не имеет* кривизны (не выпукло и не имеет

седловидной формы).^[57]

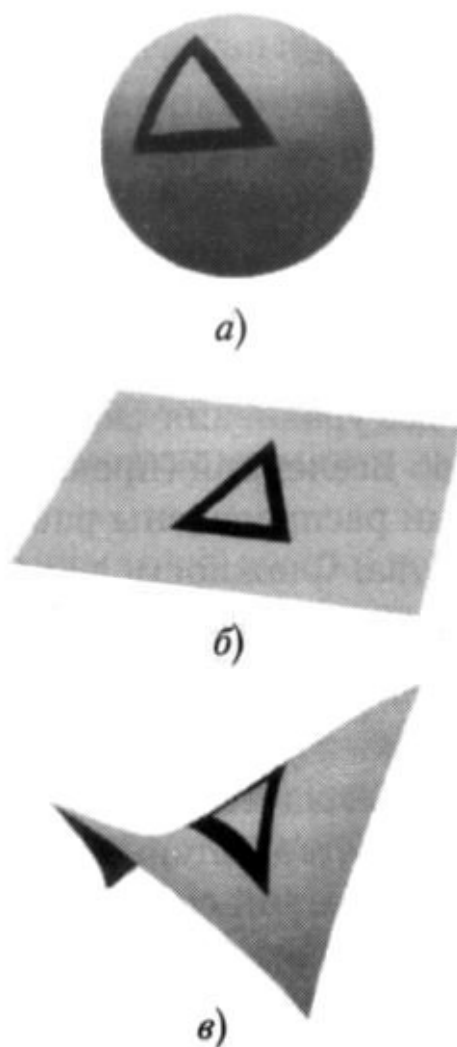


Рис. 8.6. Использование двумерных аналогий для полностью симметричных пространств, в которых вид из любой точки пространства такой же, как и из любой другой, с тремя различными типами кривизны. (а) *Положительная* кривизна, соответствующая однородной выпуклости, как у сферы. (б) *Нулевая* кривизна, которая отвечает полному отсутствию выпуклости, как на бесконечной плоскости или конечном экране видеоигры. (в) *Отрицательная* кривизна, которая отвечает седловидной поверхности

Исследователи доказали, что этот список — однородно положительная, отрицательная или нулевая — исчерпывает возможные виды кривизны для пространства, которое соответствует требованию

симметрии между всеми положениями и всеми направлениями. И это действительно потрясающе. Мы говорим о форме *всей Вселенной* — о чем-то, для чего имеется бесчисленное число возможностей. Однако, призвав великую силу симметрии, исследователи оказались в состоянии резко снизить число возможностей. Так что если вы позволите симметрии направлять ваш ответ, и ваш полуночный интервьюер даст вам несколько шансов для ответа, вы будете в состоянии принять его вызов. [{112}](#)

И всё же вы можете спросить: почему мы пришли к нескольким возможным формам для ткани пространства? Мы обитаем в одной Вселенной, так почему мы не можем точно указать на единственную форму? Только перечисленные формы гарантируют, что каждый наблюдатель, независимо от того, где во Вселенной он находится, должен видеть в больших масштабах одинаковый космос. Но такое применение симметрии, хотя и сильно ограничивает отбор, не даёт возможности полностью решить задачу и дать единственный ответ. Для этого нам нужны уравнения общей теории относительности Эйнштейна.

В качестве входных данных уравнения Эйнштейна принимают количество материи и энергии во Вселенной (предполагая, опять же из соображений симметрии, что они распределены равномерно), а на выходе они дают кривизну пространства. Сложность в том, что на протяжении многих десятилетий астрономы не могли прийти к согласию, сколько на самом деле имеется материи и энергии. Если вся материя и энергия во Вселенной была бы однородно распределена по пространству и если после этого оказалось бы, что превышена так называемая *критическая плотность*, которая составляет около 10^{-23} г на каждый кубический метр [\[58\]](#) — около пяти атомов водорода на кубический метр, — уравнения Эйнштейна дали бы положительную кривизну пространства; если бы плотность оказалась меньше критической, уравнения привели бы к отрицательной кривизне; если плотность была бы в точности равна критической, уравнения показали бы, что пространство не имеет общей кривизны. В то время как эта наблюдательная проблема ещё ждёт определённого решения, наиболее точные данные склоняют стрелку в сторону отсутствия кривизны — плоской формы пространства (но вопрос о том, может ли кролик Энерджайзер всегда двигаться в одном направлении и исчезнуть в темноте или однажды он замкнёт круг и появится у вас за спиной — простирается ли пространство бесконечно или зациклено подобно видеоэкрану, — всё ещё полностью открыт). [{113}](#)

Даже без окончательного ответа на вопрос о форме космической ткани

совершенно ясно, что симметрия является существеннейшим понятием, позволяющим осмысливать пространство и время применительно ко Вселенной в целом. Без привлечения силы симметрии мы бы застряли в самом начале.

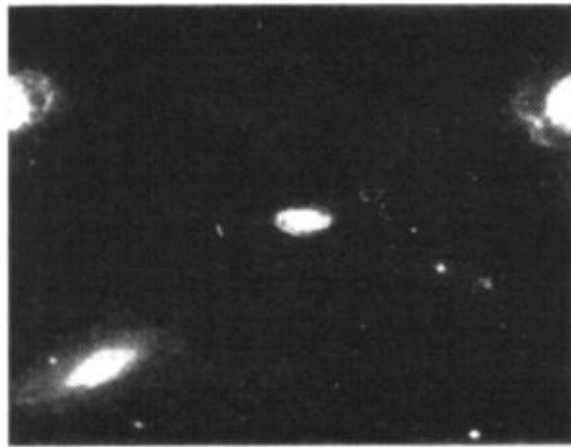
Космология и пространство-время

Теперь мы можем проиллюстрировать космическую историю, объединив концепции расширяющегося пространства и описание пространства-времени в виде буханки хлеба (блока), как в главе 3. Вспомним, что в образе буханки каждый ломтик — хотя он и двумерный — представлял всё трёхмерное пространство в отдельный момент времени с точки зрения одного определённого наблюдателя. Другие наблюдатели разрезают блок пространства-времени под другими углами, в зависимости от их относительного движения. В примерах, с которыми мы сталкивались ранее, мы не принимали во внимание расширение пространства, а, напротив, представляли, что ткань космоса фиксирована и неизменна во времени. Теперь мы можем уточнить те примеры, включив космологическую эволюцию.

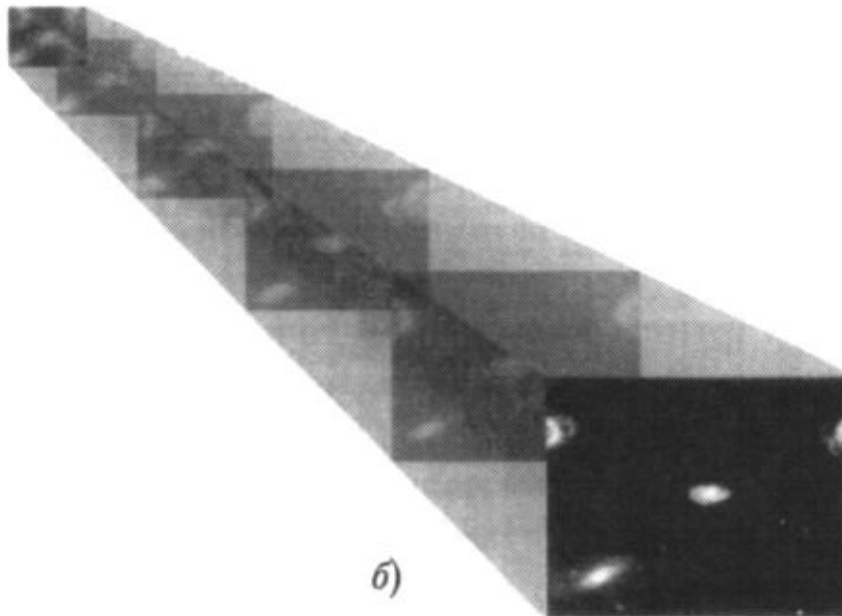
Для этого рассмотрим точку зрения наблюдателей, которые покоятся по отношению к пространству, — наблюдателей, движение которых возникает исключительно за счёт космического расширения, точно так же, как у приклеенных к воздушному шару монеток с изображениями Линкольна. Снова, хотя наблюдатели двигаются друг относительно друга, среди всех таких наблюдателей имеется симметрия — их часы идут синхронно, — так что они нарезают блок пространства-времени в точности одинаково. Только относительное движение, добавленное к движению, связанному с расширением пространства, только относительное движение *через* пространство, как нечто противоположное движению *из-за* расширения пространства, будет приводить к рассинхронизации часов и расположению их сечений блока пространства-времени под разными углами. Следует также указать точную форму пространства, и в целях сравнения мы рассмотрим некоторые из возможностей, обсуждавшихся выше.

Простейший пример — это плоская и конечная форма пространства, форма видеоигры. На рис. 8.7*a* показано одно сечение такой Вселенной, схематическое изображение, которое вы должны рассматривать как представляющее всё пространство прямо *сейчас*. Для простоты

представим, что наша Галактика, Млечный Путь, находится в середине фигуры, но будем помнить, что нет местоположения, которое каким-либо образом было бы выделено по сравнению с любыми другими. Даже края являются иллюзией. В верхней части рисунка пространство не заканчивается, поскольку вы можете пройти через край и появиться снова внизу; аналогично, слева пространство также не заканчивается, поскольку вы можете пересечь левый край и появиться снова справа. В соответствии с астрономическими наблюдениями каждая сторона должна распространяться по меньшей мере на 14 млрд световых лет (около 132 млрд трлн км) от своей центральной точки, но может быть и намного больше.



a)

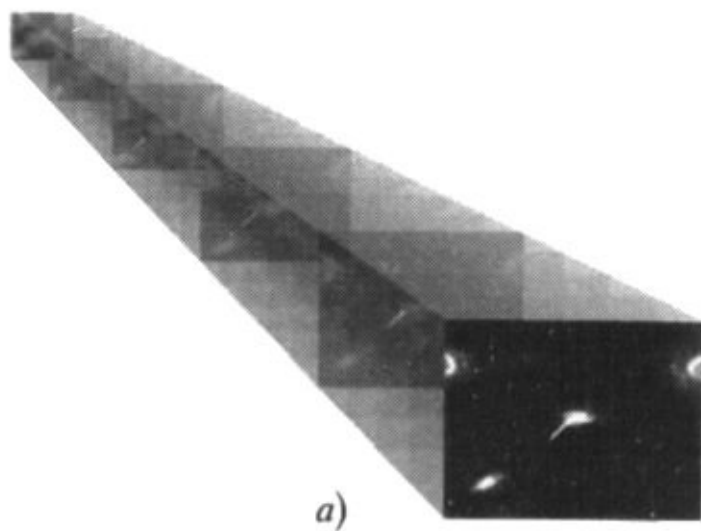


б)

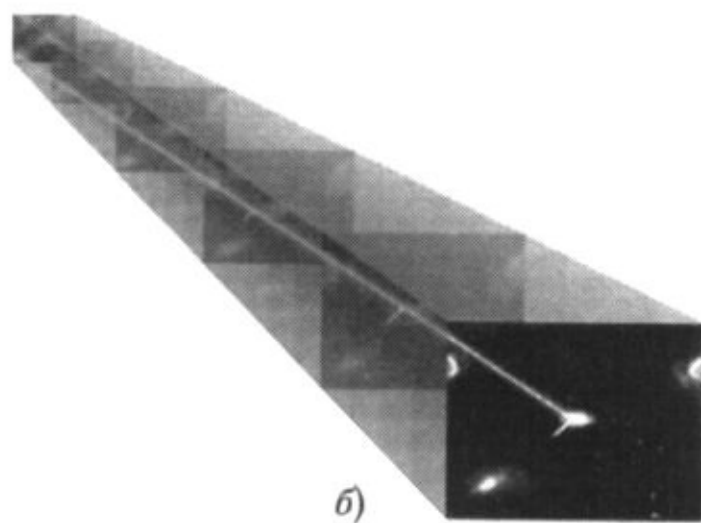
Рис. 8.7. (а) Схематическое изображение, представляющее всё пространство в настоящий момент, в предположении, что пространство плоское и конечное по протяжённости, т. е. имеющее форму экрана видеоигры. Заметьте, что галактика вверху справа продолжается через край вверху слева. (б) Схематическое представление изображения всего пространства в его эволюции во времени. Для ясности выделено несколько временных слоёв. Отметим, что полный размер пространства и расстояние между галактиками уменьшаются, по мере того как мы смотрим всё дальше назад, вглубь времени

Отметим, что сейчас мы не можем буквально видеть звёзды и галактики, как нарисовано на данном слое настоящего, поскольку, как мы обсуждали в главе 5, для света, испущенного любым объектом прямо сейчас, требуется время, чтобы достичь нас. А свет, который мы видим, когда смотрим вверх в ясную тёмную ночь, испущен очень давно — миллионы и даже миллиарды лет назад — и только сейчас завершил долгий путь к Земле, попав в телескоп и позволив нам восхититься чудесами глубокого космоса. Поскольку пространство расширяется, много лет назад, когда этот свет был испущен, Вселенная была намного меньше. Это показано на рис. 8.7б, на котором наш текущий слой настоящего помещён на правом краю буханки и показана последовательность сечений, которые изображают нашу Вселенную во всё более ранние моменты времени (левее слоя настоящего). Как вы можете видеть, общий размер пространства и расстояния между отдельными галактиками уменьшаются, когда мы рассматриваем Вселенную во всё более ранние моменты времени.

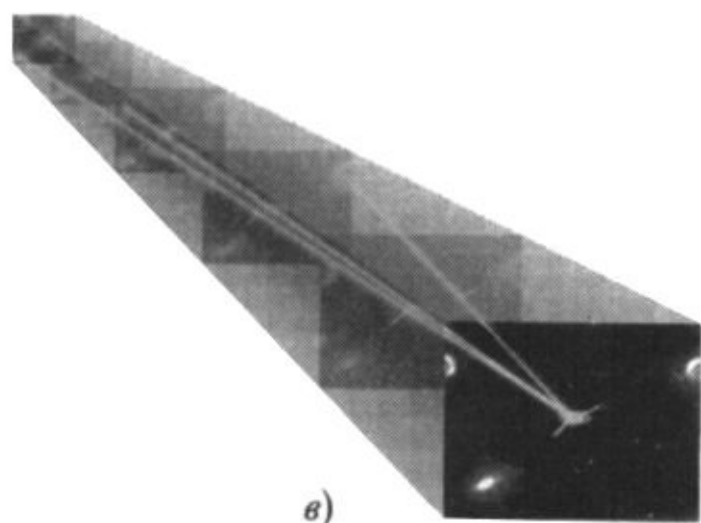
На рис. 8.8 вы можете видеть историю света, испущенного удалённой галактикой, возможно миллиард лет назад, путешествующего по направлению к нам в Млечный Путь. На начальном сечении в рис. 8.8а свет сначала испускается, и через последовательные сечения он оказывается всё ближе и ближе, в то время как Вселенная становится всё больше и больше, и наконец вы можете видеть, как он достигает нас на самом правом (на картинке) временном сечении. На рис. 8.8б, соединяя местоположения на каждом сечении, через которые проходит фронт света во время своего путешествия, мы показываем путь света через пространство-время. Поскольку мы получаем свет со многих направлений, на рис. 8.8в показаны примеры нескольких траекторий через пространство и время, которые выбирают различные лучи света, чтобы достичь нас в настоящем.



a)



b)



c)

Рис. 8.8. (а) Свет, испущенный очень давно из удалённой галактики, оказывается всё ближе и ближе к Млечному Пути, что показано на последовательных временных сечениях. (б) Когда мы, наконец, увидим удалённую галактику, мы смотрим на неё как через пространство, так и через время, поскольку свет, который мы видим, испущен очень давно. Выделен путь через пространство-время, который прошёл свет. (в) Пути через пространство-время, проходимые светом, испущенным различными астрономическими телами, которые мы видим сегодня

Эти рисунки ярко показывают, как свет из космоса может быть использован в качестве хранилища космического времени. Когда мы смотрим на галактику Андромеды, свет, который мы получаем, был испущен примерно 2 млн лет назад, так что мы видим её такой, какой она была в далёком прошлом. Когда мы смотрим на скопление галактик Волосы Вероники, свет, который мы получаем, был испущен около 300 млн лет назад, и поэтому мы видим скопление галактик Волосы Вероники таким, каким оно было в ещё более ранние эпохи. Если прямо сейчас все звёзды во всех галактиках этого скопления взорвутся как сверхновые, мы всё ещё будем наблюдать всё тот же невозмущённый образ скопления галактик Волосы Вероники, и это будет продолжаться ещё 300 млн лет; только тогда свет от взорвавшихся звёзд достигнет нас. Аналогично, астроном в скоплении Волосы Вероники, который в нашем текущем слое настоящего направил сверхмощный телескоп по направлению к Земле, будет видеть изобилие папоротников, членистоногих и ранних рептилий; он не увидит Великую китайскую стену или Эйфелеву башню ещё почти 300 млн лет. Конечно, этот астроном, хорошо разбирающийся в основах космологии, понимает, что он видит свет, испущенный из давнего прошлого Земли, и, разрезая свою собственную космическую пространственно-временную буханку, будет относить ранние земные бактерии к своей соответствующей эпохе, своему соответствующему выбору временного сечения.

Всё это подразумевает, что мы, как и астроном из скопления галактик Волосы Вероники, двигаемся только с космическим потоком, связанным с расширением пространства, поскольку это гарантирует, что его сечения пространственно-временного блока соответствуют нашим, — это гарантирует, что его списки настоящего согласуются с нашими списками настоящего. Однако если он нарушит стройность рядов и станет быстро

двигаться, через пространство в дополнение к космическому потоку, его временные слои будут наклонены по отношению к нашим, как на рис. 8.9. В этом случае, как и в случае с Чуви в главе 5, настоящее этого астронома будет соответствовать тому, что мы рассматриваем как будущее или как прошлое (в зависимости от того, направлено ли дополнительное движение к нам или от нас). Нужно отметить, что его временные слои больше не будут пространственно однородными. Каждый наклонённый слой на рис. 8.9 пересекает Вселенную в ряде различных эпох, так что эти сечения далеки от однородности. Это существенно усложняет описание космической истории, вот из-за чего физики и астрономы, как правило, не рассматривают такие точки зрения. Обычно же рассматривают точку зрения наблюдателей, которые двигаются только с космическим потоком, поскольку это даёт однородные сечения, — но, строго говоря, каждая точка зрения применима так же, как и любая другая.

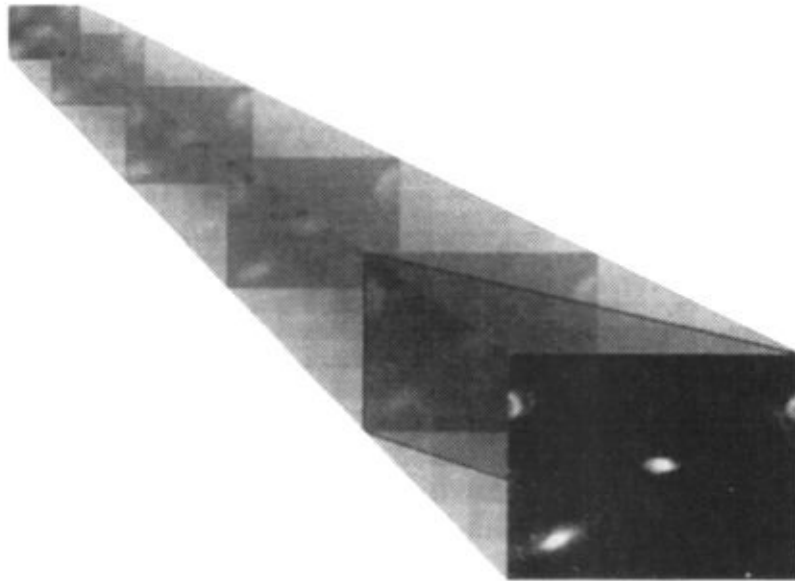


Рис. 8.9. Временное сечение наблюдателя, обладающего существенным дополнительным движением по отношению к космическому потоку, связанному с расширением пространства

По мере того как мы смотрим всё левее вдоль космической пространственно-временной буханки, Вселенная становится всё меньше и плотнее. И точно так же, как велосипедная камера становится горячее и горячее, когда вы накачиваете в неё всё больше и больше воздуха, Вселенная становится всё горячее и горячее по мере того как материя и излучение всё больше и больше сжимаются за счёт сжатия пространства.

Если мы вернёмся к одной десятиллионной доле секунды после начала, Вселенная будет столь плотна и столь горяча, что обычная материя распадётся на первичную плазму из элементарных составляющих природы. И если мы продолжим наше путешествие назад, прямо к моменту вблизи самого «нуля» времени — времени Большого взрыва, — вся известная Вселенная сожмётся до размера, по сравнению с которым точка в конце этого предложения выглядит гигантской.^[59] Плотности были настолько велики, а условия настолько экстремальны, что самые утончённые физические теории, которыми мы сегодня располагаем, не дают понимания протекавших процессов. По причинам, которые будут постепенно становиться более ясными, успешно работающие законы физики, открытые в двадцатом столетии, перестают действовать в таких экстремальных условиях, оставляя нас без руководства для понимания начала времени. Мы вскоре увидим, что недавние исследования дают надежду, но пока мы осознаём неполноту нашего понимания того, что происходило в начале, при приближении к размытому пятну на левом краю космической пространственно-временной буханки, — это наша версия *terra incognita* на картах прошлого. В качестве заключительного штриха мы даём рис. 8.10, как иллюстрирующий космическую историю несколькими широкими мазками.

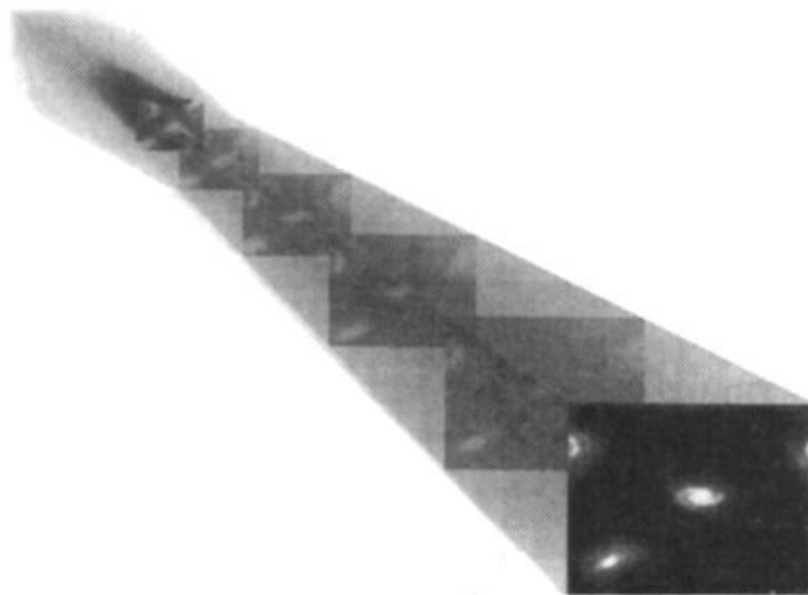


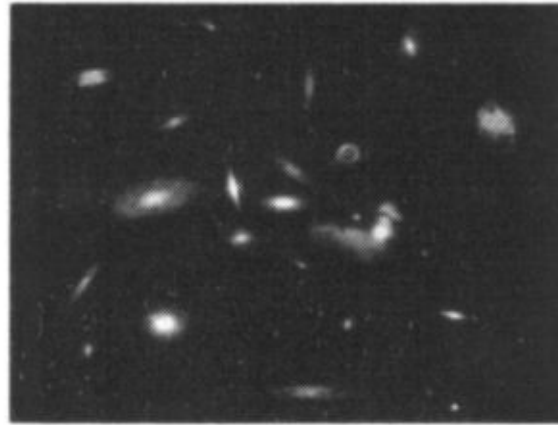
Рис. 8.10. Космическая история — пространственно-временная «буханка» — для плоской Вселенной, имеющей конечную пространственную протяжённость. Размытое

изображение наверху обозначает недостаток наших знаний о начале Вселенной

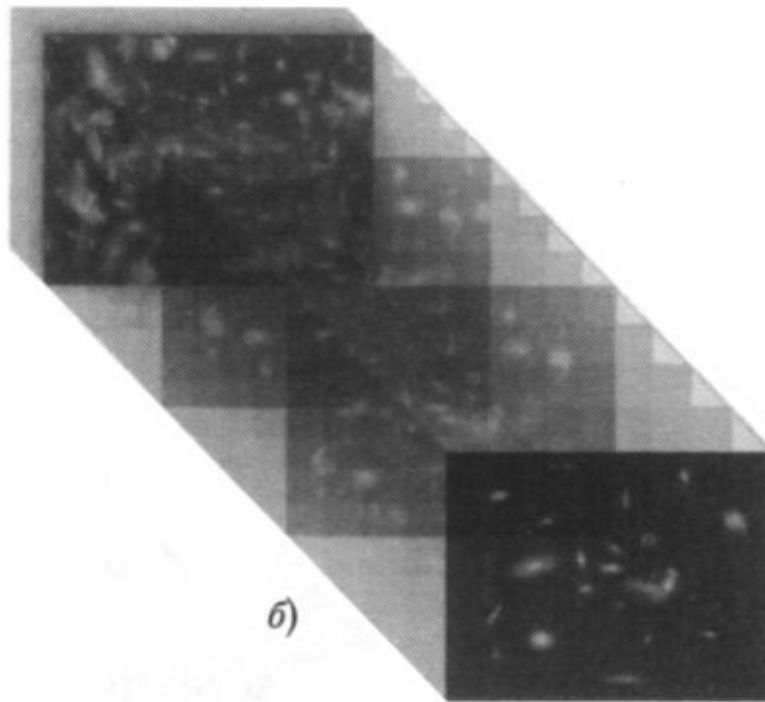
Альтернативные формы

До сих пор мы считали, что пространство имеет форму, подобную экрану видеоигры, но имеются и другие возможности. Например, если наблюдения, в конце концов, покажут, что пространство имеет сферическую форму, тогда по мере того как мы продвигаемся всё дальше назад во времени, размер сферы становится всё меньше, Вселенная становится всё горячее и плотнее, и при нулевом времени мы столкнёмся с некоторой разновидностью начала типа Большого взрыва. Нарисовать картинку, аналогичную рис. 8.10, проблематично, поскольку сферы трудно сложить в стопку одна к другой (вы можете, например, представить «сферический батон», в котором каждое сечение является сферой, окружающей предыдущую), но если отбросить графические трудности, физика в основном та же самая.

Случаи бесконечного плоского пространства и бесконечного седловидного пространства также обладают многими одинаковыми особенностями вместе с двумя уже обсуждавшимися формами, но в одном они существенно отличаются. Посмотрим на рис. 8.11, на котором временные слои представляют плоское пространство, которое бесконечно протяжённо (конечно, мы можем показать только его часть). Когда вы смотрите всё дальше вглубь времени, пространство сжимается; по мере того как вы продвигаетесь в прошлое на рис. 8.11б, галактики становятся всё ближе и ближе друг к другу. Однако общий размер пространства остаётся неизменным. Почему? Дело в том, что бесконечность — забавная вещь. Если пространство бесконечно, и вы сокращаете все расстояния в два раза, размер пространства становится равным половине от бесконечности, и это всё ещё бесконечность. Так что хотя, по мере того как вы уходите всё дальше в прошлое, вещи сближаются друг с другом и плотности становятся всё выше, но общий размер Вселенной остаётся бесконечным; плотность растёт везде на протяжении всего бесконечного пространства. Это даёт весьма отличающуюся картину Большого взрыва.



a)



б)

Рис. 8.11. (а) Схематическое изображение бесконечного пространства, заполненного галактиками. (б) Пространство всё более сжимается по мере перехода к более ранним временам, так что галактики становятся всё ближе друг к другу и всё более плотно упакованными, — но общий размер бесконечного пространства остаётся бесконечным. Наше неведение относительно того, что происходило в самые ранние времена, опять обозначено размытостью, но здесь размытость распространена по всей бесконечной протяжённости

пространства

Обычно мы считаем, что Вселенная начинается с точки, примерно как на рис. 8.10, когда внешнее пространство или время отсутствуют. Затем, в результате некоторого взрыва, пространство и время развёртываются из своей сжатой формы, и расширяющаяся Вселенная начинает полёт. Но если Вселенная пространственно бесконечна, значит, *в момент Большого взрыва уже имеется бесконечная протяжённость пространства*. В этот начальный момент возникает огромная плотность энергии и достигаются несравнимые ни с чем температуры, однако эти экстремальные условия существуют везде, а не только в одной отдельной точке. В таком случае Большой взрыв не имеет места в одной точке; напротив, Большой взрыв происходит *везде* на бесконечности. По сравнению с обычным началом в точке, это похоже на множество Больших взрывов в каждой точке бесконечной пространственной протяжённости. После Взрыва пространство расширилось, но его общий размер не возрастал, поскольку нечто, уже бесконечное, не может стать ещё больше. Что возрастало, так это расстояния между объектами вроде галактик (как только они сформировались), как вы можете проследить слева направо на рис. 8.11б. Наблюдатель вроде вас или меня, посмотрев наружу из одной галактики или из другой, увидит все окружающие галактики разбегающимися прочь, точно так, как это и обнаружил Хаббл.

Обратите внимание, что этот пример бесконечного плоского пространства далеко не чисто академический. Мы увидим, что имеются веские основания считать общую форму пространства не искривлённой, а поскольку до сих пор нет оснований считать, что пространство имеет форму экрана видеоигры, плоская бесконечно большая пространственная форма является главным претендентом на роль крупномасштабной структуры пространства-времени.

Космология и симметрия

Симметричный подход был явно необходим для разработки современной космологической теории. Понятие времени, его применимость ко Вселенной как целому, общая форма пространства и даже лежащая в основе общая теория относительности — все они опираются на фундамент симметрии. Несмотря на это, идеи симметрии связаны с эволюционирующим космосом ещё одним способом. В ходе истории Вселенной её температура изменялась в огромном диапазоне от нескольких

невыносимо горячих моментов сразу после Взрыва до нескольких градусов выше абсолютного нуля в глубоком космосе сегодня. И, как мы увидим в следующей главе, вследствие критической взаимосвязи между симметрией и теплом то, что мы видим сегодня, является, судя по всему, холодным остатком намного более богатой симметрии, которая формировала раннюю Вселенную и предопределила некоторые из самых привычных и существенных особенностей космоса.

Глава 9. Испарение вакуума

Теплота, ничто и объединение

В течение 95% истории Вселенной космический корреспондент, интересующийся общей, нарисованной широкими мазками формой Вселенной, сообщал бы одно и то же: *Вселенная продолжает расширяться. Материя продолжает рассеиваться вследствие расширения. Плотность Вселенной продолжает уменьшаться. Температура продолжает падать. В самых больших масштабах Вселенная сохраняет симметричный однородный вид.* Но не всегда можно было описывать космос так легко. Самые ранние этапы потребовали бы чрезвычайно интенсивного репортажа, поскольку в те начальные моменты времени Вселенная испытывала быстрые изменения. Теперь мы знаем — то, что происходило тогда, сыграло определяющую роль в том, что мы наблюдаем сегодня.

В этой главе мы сфокусируемся на критических моментах в первые доли секунды после Большого взрыва, когда, как мы думаем, количество симметрии, заключённой во Вселенной, неожиданно менялось, причём с каждым изменением начинались совершенно различные эпохи в космической истории. В то время как сейчас корреспондент может неспешно передавать несколько одинаковых строчек каждые несколько миллиардов лет, в те ранние моменты быстрых изменений симметрии его работа должна была быть значительно более напряжённой, поскольку основная структура материи и сил, отвечающих за её поведение, была совершенно необычной. Причина связана с взаимосвязью между *теплотой* и *симметрией* и требует полного переосмысления понятия пустого пространства и понятия «ничто». Как мы увидим, такое переосмысление не только существенно обогащает наше понимание Вселенной в первые моменты, но и подводит на шаг ближе к осуществлению мечты, которая восходит к Ньютону, Максвеллу и в особенности к Эйнштейну, — мечты *обунификации*. Также важно, что эти разработки знаменуют начало нового, самого современного этапа космологических исследований — *инфляционной космологии*, подхода, который даёт ответы на некоторые наиболее животрепещущие вопросы и наиболее трудные загадки, по поводу которых стандартная модель Большого взрыва молчит.

Теплота и симметрия

Когда предметы становятся очень горячими или очень холодными, они иногда изменяются. И иногда изменения столь вопиющие, что вы даже не можете распознать предмет, с которого начинали. Так как мы имеем очень высокую температуру Вселенной сразу после Большого взрыва и последовавшее вслед за ним быстрое падение температуры, по мере того как пространство расширялось и охлаждалось, поэтому понимание последствий изменения температуры играет ключевую роль в попытках разобраться с ранней историей Вселенной. Но начнём с более простого. Начнём со льда.

Если вы нагреваете очень холодный кусочек льда, ничего особенного поначалу не происходит. Хотя его температура растёт, его внешний вид остаётся почти неизменным. Но если вы доведёте его температуру до нуля градусов по Цельсию и продолжите подводить тепло, внезапно произойдёт нечто неожиданное. Твёрдый лёд начнёт таять и превратится в жидкую воду. Пусть привычность этой трансформации не лишит спектакль яркости. Без предшествующего опыта, относящегося к льду и воде, было бы трудно осознать тесную связь между ними. Одно является телом, твёрдым как камень, тогда как другое является вязкой жидкостью. Простые наблюдения не обнаруживают прямых признаков того, что их молекулярный состав, H_2O , идентичен. Если бы вы никогда до сих пор не видели лёд или воду, и вам бы показали бочку одного и другого вещества, сначала вы бы, вероятно, подумали, что они никак не связаны. И когда каждое вещество пересекло бы границу в ноль градусов по Цельсию, вы стали бы свидетелем удивительной алхимии, как они превращаются друг в друга.

Если вы продолжите нагревать жидкую воду, вы сначала обнаружите, что при дальнейшем росте температуры ничего особенного не происходит. Но когда вы достигнете $100^{\circ}C$, произойдёт другое резкое изменение: жидкая вода начнёт кипеть и превратится в пар, горячий газ, который опять-таки неочевидным образом связан с жидкой водой или твёрдым льдом. Хотя, конечно, все три вещества имеют одинаковый молекулярный состав. Изменения от твёрдого тела к жидкости и от жидкости к газу известны как *фазовые переходы*. Многие вещества проходят через сходную последовательность изменений, если их температура изменяется в достаточно широких пределах. [\[114\]](#)

Симметрия играет центральную роль в фазовых переходах. Почти во всех случаях, если вы сравните подходящую меру симметрии чего-либо до

и после фазового перехода, вы обнаружите в ней существенное изменение. В молекулярных масштабах, например, лёд имеет кристаллическую форму, в которой молекулы H_2O расположены в упорядоченной гексагональной решётке. Подобно симметриям куба на рис. 8.1, полный рисунок молекул льда остаётся неизменным только при определённых специальных преобразованиях, таких как вращения на угол 60° относительно отдельных осей гексагональной решётки. Когда же мы нагреваем лёд, кристаллическое упорядочивание переходит в беспорядочную однородную массу молекул — жидкую воду, — которая остаётся неизменной при вращениях на любой угол относительно любой оси. Итак, нагревая лёд и заставляя его перейти через фазовый переход из твёрдого состояния в жидкое, вы делаете его более симметричным. (Стоит запомнить, что хотя интуитивно кажется, что лёд, как более упорядоченный, является более симметричным, на самом деле всё наоборот; нечто является более симметричным, если оно может быть подвергнуто большему числу преобразований, таких как вращения, при которых его внешний облик остаётся неизменным.)

Аналогично, когда мы нагреваем жидкую воду и она переходит в газообразный пар, фазовый переход снова приводит к росту симметрии. В жидкой воде отдельные молекулы H_2O в среднем упакованы так, что водородная сторона одной молекулы соседствует с кислородной стороной её соседки. Если бы вы повернули ту или иную молекулу в массе воды, она бы заметно нарушила молекулярный узор. Но когда вода выкипает и переходит в пар, молекулы летают совершенно свободно; тут нет больше никакого узора взаимных ориентаций молекул H_2O , и поэтому, когда вы поворачиваете молекулу или группу молекул, газ будет выглядеть тем же самым. Итак, точно так же как переход ото льда к воде приводит к росту симметрии, переход от воды к пару приводит к тому же. Большинство веществ (но не все^{[\[115\]](#)}) ведут себя сходным образом, испытывая повышение симметрии при переходе из твёрдой фазы в жидкую и из жидкой в газообразную.

Ситуация будет во многом похожей, если вы будете охлаждать воду или почти любое другое вещество; всё происходит с точностью до наоборот. Например, когда вы охлаждаете газообразный пар, сначала ничего не происходит, но когда температура падает до 100°C , внезапно начинается конденсация пара в жидкую воду; когда вы охлаждаете жидкую воду, ничего не будет происходить до тех пор, пока вы не достигнете 0°C , при которых внезапно начинается замерзание в твёрдый лёд. И, следуя тем же рассуждениям относительно симметрии — но в обратном порядке, —

мы заключаем, что оба этих фазовых перехода сопровождаются понижением симметрии.^[60]

Достаточно о льде, воде, паре и их симметриях. Как всё это связано с космологией? В 1970-е гг. физики обнаружили, что не только объекты во Вселенной могут испытывать фазовые переходы, *но и космос как целое также может это делать*. На протяжении последних 14 млрд лет Вселенная неуклонно расширялась и становилась всё более разреженной. И точно так же, как при спускании велосипедной камеры она охлаждается, температура расширяющейся Вселенной неуклонно падала. В течение большей части этого уменьшения температуры ничего особенного не происходило. Но имеются основания думать, что когда Вселенная переходила через особые критические температуры, аналогичные 100°C для пара и 0°C для воды, она подвергалась радикальному изменению и испытывала резкое снижение симметрии. Многие физики уверены, что сейчас мы живём в «конденсированной» или «замороженной» фазе Вселенной, которая сильно отличается от более ранних эпох. Космологические фазовые переходы не означают буквально конденсации газа в жидкость или замерзания жидкости в твёрдое тело, хотя и имеется много качественно сходных свойств с этими более привычными примерами. Скорее, то «вещество», которое конденсируется или замерзает, когда Вселенная охлаждается до некоторых критических температур, является полем — более точно, полем Хиггса. Посмотрим, что это означает.

Сила, материя и поля Хиггса

Поля являются основой большей части современной физики. Электромагнитное поле, обсуждавшееся в главе 3, является, возможно, простейшим и наиболее хорошо известным из полей природы. Проводя жизнь среди радио и телевизионных передач, сотовых телефонов, солнечного тепла и света, мы все постоянно купаемся в море электромагнитных полей. Фотоны являются элементарными составляющими электромагнитных полей и могут рассматриваться как микроскопические переносчики электромагнитной силы. Когда вы что-нибудь видите, вы можете думать об этом в терминах волнового электромагнитного поля, входящего в ваш глаз и стимулирующего сетчатку, или как о частицах-фотонах, входящих в ваш глаз и делающих то же самое. По этой причине фотон иногда описывается как *частица — переносчик* электромагнитной силы.

Гравитационное поле также привычно, поскольку оно постоянно и надёжно удерживает нас и всё, что нас окружает, на земной поверхности. Как и в случае с электромагнитными полями, мы все погружены в море гравитационных полей; Земля здесь доминирует, но мы также чувствуем гравитационное поле Солнца, Луны и других планет. Точно так же, как фотоны являются частицами, составляющими электромагнитное поле, физики уверены, что частицами, составляющими гравитационное поле, являются гравитоны. Гравитоны до сих пор не открыты экспериментально, но это и не удивительно. Гравитация намного слабее всех сил (например, обычный магнит, который висит на вашем холодильнике, может поднять скрепку для бумаги, преодолев гравитационное притяжение *всей* Земли), так что вполне понятно, что экспериментаторы ещё не обнаружили мельчайшие составляющие слабейшей силы. Однако даже без экспериментального подтверждения большинство физиков уверено, что точно так же, как фотоны передают электромагнитную силу (являются переносчиками электромагнитных сил), гравитоны передают гравитационную силу (являются переносчиками сил тяготения). Когда вы роняете стакан, то можете думать о происходящем в терминах гравитационного поля Земли, притягивающего стакан; либо, используя более изощрённое геометрическое описание Эйнштейна, вы можете представить, как стакан соскальзывает вдоль углубления в ткани пространства-времени, вызванного присутствием Земли; либо — если гравитоны на самом деле существуют — вы можете также думать об этом как об обмене гравитонами между Землёй и стаканом. Гравитоны передают гравитационное «сообщение», которое «приказывает» стакану падать на Землю.

Кроме этих хорошо известных силовых полей имеются две другие силы природы, *сильное ядерное взаимодействие* и *слабое ядерное взаимодействие*, и они также переносятся полями. Ядерные силы не так привычны, как электромагнетизм и гравитация, поскольку они действуют только на атомных и субатомных масштабах. Но даже при этом их влияние на повседневную жизнь благодаря ядерным реакциям, заставляющим Солнце светить, ядерным реакциям, сопровождающим работу атомных реакторов, а также радиоактивному распаду элементов, таких как уран и плутоний, не менее важно. Поля сильного и слабого ядерного взаимодействия называются полями Янга–Миллса в честь Чжэньнина Янга и Роберта Миллса, которые в 1950-е гг. разработали основы теории таких полей. И точно так же, как электромагнитные поля составлены из фотонов, а поля тяготения, как мы думаем, должны быть составлены из гравитонов,

сильные и слабые поля тоже имеют частицы в качестве своих составляющих. Частицы сильного взаимодействия называются *глюонами*, а частицы слабого взаимодействия называются *W-* и *Z-частицами*. Существование этих частиц было подтверждено экспериментами на ускорителях, проведёнными в Германии и Швейцарии в конце 1970-х и начале 1980-х гг.

Поля имеют отношение также и к материи. Грубо говоря, вероятностные волны квантовой механики можно представить как поля, заполняющие пространство, которые определяют вероятность, с которой та или иная частица материи находится в том или ином месте. Например, электрон может рассматриваться как частица — одна из тех, что могут оставить точку на фосфоресцирующем экране, как на рис. 4.4, — но он может (и должен) также рассматриваться в терминах волнового поля, которое может дать интерференционную картину на фосфоресцирующем экране, как на рис. 4.3б. ^[116] Фактически, хотя я не хочу здесь вдаваться в подробности, ^[117] вероятностная волна электрона тесно связана с объектом, который называется *электронным полем* — полем, которое во многих отношениях сходно с электромагнитным полем, но в котором электрон играет роль, аналогичную фотону, будучи мельчайшей составляющей электронного поля. Полевое описание того же типа справедливо и для всех других разновидностей частиц материи.

Вы можете подумать, что мы охватили всё, рассмотрев материальные и силовые поля. Но существует общее убеждение, что на этом дело далеко не кончается. Многие физики твёрдо уверены, что имеется ещё третий тип поля, который пока экспериментально не обнаружен, но который в течение последней пары десятилетий играл центральную роль как в новейших космологических теориях, так и в физике элементарных частиц. Это поле называется полем Хиггса в честь шотландского физика Петера Хиггса. ^[118] И если идеи следующего раздела верны, то вся Вселенная пронизана океаном поля Хиггса — холодным следом Большого взрыва, — который отвечает за многие свойства частиц, из которых состоите вы и я, и всё, с чем мы сталкиваемся.

Поля в охлаждающейся Вселенной

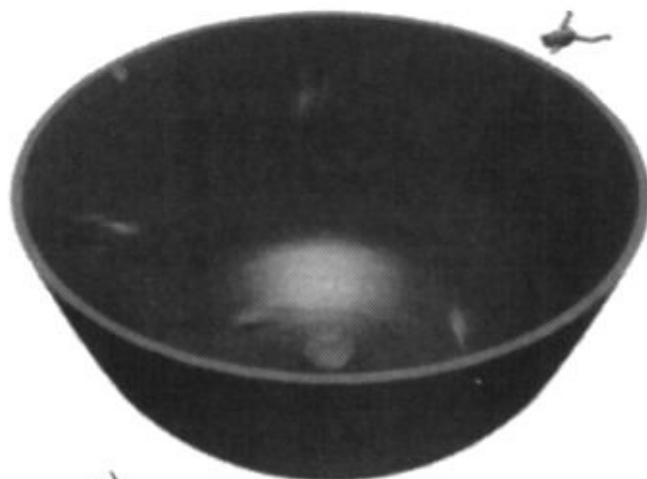
Поля реагируют на температуру примерно так же, как и обычная материя. Чем выше температура, тем больше будет величина вибрации поля — подобно поверхности бурно кипящего котелка воды. При низкой

температуре, характерной сегодня для глубокого космоса ($2,7^\circ$ выше абсолютного нуля или, как это обычно обозначается, $2,7\text{K}$ — по Кельвину), или даже при более высоких температурах здесь на Земле такая вибрация поля ничтожна. Но температура сразу после Большого взрыва была столь огромна (считается, что через 10^{-43} с после Большого взрыва температура была около 10^{32}K), что все поля колебались со страшной силой.

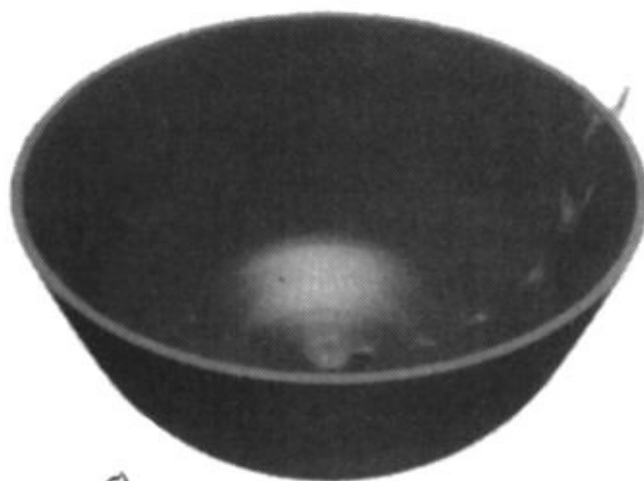
По мере того как Вселенная расширялась и охлаждалась, начальная гигантская плотность материи и излучения неуклонно падала, безбрежные просторы Вселенной становились всё более пустыми и колебания поля ослабевали. Для большинства полей это означало, что их величина в среднем стремилась к нулю. В некоторый момент величина определённого поля может подняться немного выше нуля (пик), моментом позже она может опуститься немного ниже нуля (впадина), но в среднем величина большинства полей близка к нулю — к величине, которую мы интуитивно ассоциируем с отсутствием чего-либо или с пустотой.

Именно тут проявляет себя поле Хиггса. Исследователи пришли к пониманию, что имеется множество полей, которые имеют сходные свойства при огромных температурах сразу после Большого взрыва: они неистово колеблются вверх-вниз. Но исследователи уверены, что когда температура Вселенной существенно упала, поле Хиггса сконденсировалось в особую *ненулевую* величину по всему пространству (точно так же, как пар конденсируется в жидкую воду, когда его температура существенно падает). Физики говорят об этом как о возникновении *ненулевой величины вакуумного среднего поля Хиггса* — но, чтобы упростить технический жаргон, я буду говорить об этом как о формировании *Хиггсова океана*.

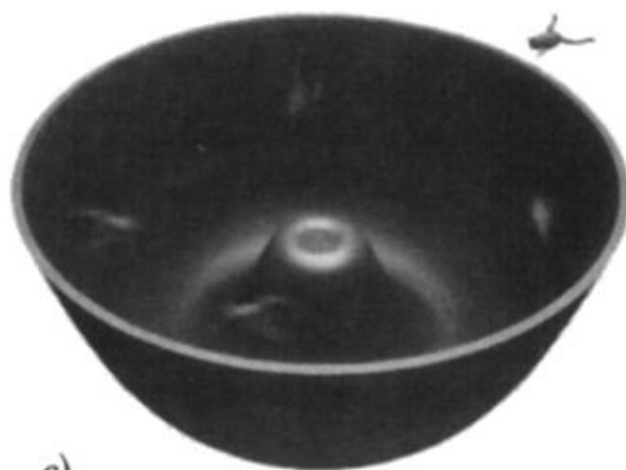
Это похоже на то, что будет происходить, если вы посадите лягушку в горячую металлическую чашу, как показано на рис. 9.1а, с кучей червяков в центре. Сначала лягушка будет прыгать так и сяк — высоко вверх, вниз, влево, вправо — в отчаянных попытках спасти свои лапы от ожога, и в среднем будет находиться так далеко от червяков, что даже не будет знать, что они здесь есть. Но по мере остывания чаши лягушка будет успокаиваться, будет прыгать слабее и мягко скатится в наиболее спокойное место на дне чаши. Там, приблизившись к центру чаши, она, наконец, встретится со своим ужином, как показано на рис. 9.1б.



a)



b)



c)

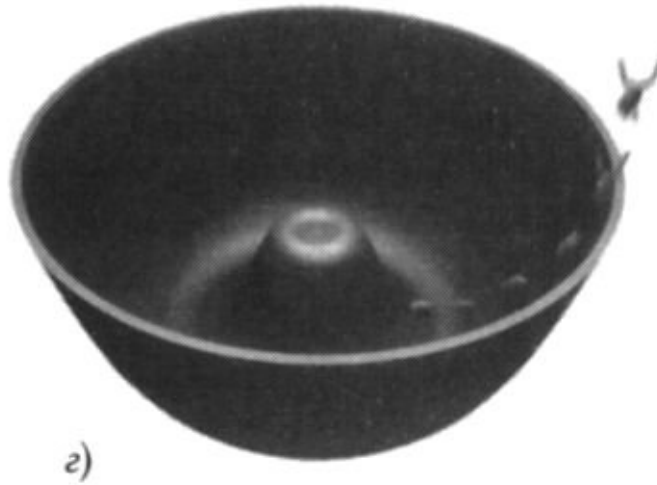


Рис. 9.1. (а) Лягушка, брошенная в горячую металлическую чашу, постоянно прыгает по ней. (б) Когда чаша остывает, лягушка успокаивается, прыгает намного меньше и скатывается вниз к середине чаши. (в) Как и на рис. а, но с горячей чашей иной формы. (г) Как и на рис. б, но теперь, когда чаша остывает, лягушка соскальзывает вниз в жёлоб, который находится на некотором расстоянии от центра чаши (где находятся червяки)

Но если чаша имеет иную форму, как показано на рис. 9.1в, события будут разворачиваться иначе. Представьте снова, что чаша сначала очень горяча и кучка червяков опять лежит в центре чаши, но теперь центр приподнят в виде возвышения. Если вы посадите в чашу лягушку, она опять будет неистово прыгать туда-сюда, оставаясь в неведении относительно приза, возвышающегося по центру. Теперь, когда чаша остынет, лягушка успокоится, уменьшит свои прыжки и сползёт вниз по скользкой стенке чаши. Но из-за новой формы лягушка никогда не достигнет центра чаши. Вместо этого она сползёт к жёлобу чаши и останется на расстоянии от кучи червяков, как показано на рис. 9.1г.

Если мы представим, что расстояние между лягушкой и кучкой червяков представляет величину поля, — чем дальше лягушка от червяков, тем больше величина поля, — а высота положения лягушки представляет энергию, содержащуюся в такой величине поля, — чем выше в чаше оказывается лягушка, тем большую энергию содержит поле, — то эти примеры хорошо показывают поведение полей при охлаждении Вселенной. Когда Вселенная горяча, поля неистово мечутся от одного значения к другому, почти как лягушка, прыгающая с места на место в чаше. Когда

Вселенная охлаждается, поля «успокаиваются», прыгают реже и не столь безумно, и их величина сползает вниз к меньшей энергии.

Но есть одно обстоятельство. Как и в примере с лягушкой, имеется возможность двух качественно разных исходов. Если форма чаши энергии поля — так называемая *потенциальная энергия* — подобна рис. 9.1а, величина поля во всём пространстве будет сползать всеми способами вниз, к нулю, к центру чаши, точно так же, как лягушка разными способами соскальзывает к куче червяков. Однако если потенциальная энергия выглядит подобно рис. 9.1в, величина поля не будет стремиться к нулю, т. е. к центру энергетической чаши. Вместо этого, точно так же, как лягушка соскользнёт в жёлоб, который находится на ненулевом расстоянии от кучки червяков, величина поля также сползёт вниз в жёлоб, расположенный на ненулевом расстоянии от центра чаши, — и это означает, что поле будет иметь ненулевую величину.^[119] Такое поведение и является характерным для полей Хиггса. Когда Вселенная остывает, величина поля Хиггса застревает в жёлобе и никогда не становится нулевой. А поскольку то, что мы описываем, будет происходить однородно во всём пространстве, то Вселенная будет пропитана однородным и ненулевым полем Хиггса — Хиггсовым океаном.

Причина, по которой это происходит, проливает свет на фундаментальную особенность полей Хиггса. Когда область пространства становится всё холоднее и всё более пустой — когда материя и излучение становятся всё более разреженными, — энергия в области становится всё более низкой. В предельном случае можно получить наипустейшую область пространства, понижая её энергию настолько, насколько это возможно. Для обычных полей их вклад в энергию будет наименьшим, когда их величина как-нибудь скатится вниз к центру чаши, как на рис. 9.1б; они имеют нулевую энергию, когда их величина равна нулю. Это имеет интуитивно ясный смысл, поскольку мы ассоциируем опустение области пространства с обращением всего, включая величины полей, в нуль.

Но в случае поля Хиггса дела обстоят иначе. Точно так же, как лягушка может достичь центральной площадки на рис. 9.1в и сократить до нуля расстояние к кучке червяков, только если она имеет достаточно энергии, чтобы допрыгнуть до неё из окружающего площадку жёлоба, поле Хиггса может достичь центра энергетической чаши и принять нулевое значение, только если оно имеет достаточный запас энергии, чтобы преодолеть выпуклость в центре чаши. Если, напротив, лягушка имеет мало энергии или совсем её не имеет, она соскальзывает в жёлоб как на

рис. 9.1г — на ненулевое расстояние от кучки червяков. Аналогично, поле Хиггса с малой энергией или без энергии также сползёт в жёлоб чаши — на ненулевое расстояние от центра чаши, значит, будет иметь ненулевую величину.

Чтобы заставить поле Хиггса иметь нулевую величину — величину, которая выглядела бы наиболее близкой к полному отсутствию поля в пространстве, величину, которая казалась бы наиболее близкой к состоянию пустоты, — вы должны были бы повысить его энергию и, говоря на языке энергий, область пространства была бы не столь пуста, как она, возможно, могла бы быть. Хотя это и звучит противоречиво, но удаление поля Хиггса — т. е. уменьшение его величины до нуля — равносильно добавлению энергии в область пространства. В качестве грубой аналогии вспомним о прекрасных шумоподавляющих наушниках, которые производят звуковые волны, гасящие волны, приходящие из окружающей среды. Если наушники работают идеально, вы слышите тишину, когда они производят свой звук, но вы слышите внешний шум, если вы их выключаете. Исследователи пришли к мысли, что точно так же, как вы слышите меньше шума, когда наушники производят звук, на который они запрограммированы, так и пустое холодное пространство заключает в себе настолько мало энергии, насколько это возможно, — оно настолько пусто, насколько это может быть, — когда оно наполнено Хиггсовым океаном.

Процесс, в котором поле Хиггса приобретает ненулевую величину во всём пространстве, — процесс формирования Хиггсова океана — называется *спонтанным нарушением симметрии*^[61] и является одной из наиболее важных идей, появившихся в теоретической физике последних десятилетий XX в. Давайте посмотрим, почему.

Океан Хиггса и происхождение массы

Если поле Хиггса имеет ненулевую величину (если мы все погружены в океан поля Хиггса), то не должны ли мы его чувствовать, или видеть, или знать о нём каким-то иным образом? Безусловно, должны. И современная физика утверждает, что мы это делаем. Покачайте своей рукой вперёд и назад. Вы можете почувствовать работу мускулов,двигающих массу вашей руки влево, вправо и обратно. Если вы держите шар для боулинга, ваши мускулы будут работать сильнее, поскольку, чтобы двигать более значительную массу, необходимо приложить большую силу. В этом смысле

масса объекта представляет сопротивление этого объекта попытке заставить его двигаться; более точно, масса представляет сопротивление объекта изменению его движения — ускорению, — когда сначала мы двигаемся влево, потом вправо, а потом опять влево. Но откуда происходит это сопротивление ускорению? Или, говоря физическим языком, что даёт объекту его инерцию?

В главах 2 и 3 мы сталкивались с различными предложениями Ньютона, Маха и Эйнштейна, выдвинутыми в качестве *частичных* ответов на этот вопрос. Эти учёные пытались установить стандарт покоя, по отношению к которому могли бы быть определены ускорения, подобные тем, которые возникают в эксперименте с вращающимся ведром. Для Ньютона стандартом было абсолютное пространство; для Маха это были удалённые звёзды; а для Эйнштейна это было сначала абсолютное пространство-время (в специальной теории относительности), а затем гравитационное поле (в общей теории относительности). Но однажды установив стандарт покоя и, в особенности, установив систему отсчёта для определения ускорения, ни один из этих учёных не сделал следующий шаг к объяснению, *почему* объекты сопротивляются ускорению. То есть никто из них не определил механизм, с помощью которого объект приобретает свою массу (свою инерцию) — свойство, благодаря которому тело сопротивляется ускорению. С помощью поля Хиггса физики теперь предложили ответ.

Атомы, которые составляют вашу руку, шар для боулинга, который вы можете поднять, все состоят из протонов, нейтронов и электронов. Протоны и нейтроны, как обнаружили экспериментаторы в конце 1960-х гг., состоят из трёх частиц меньшего размера, известных как кварки. Так что когда вы машете рукой туда-сюда, вы на самом деле размахиваете туда-сюда всеми составляющими её кварками и электронами. Океан Хиггса, в который, как утверждает современная теория, мы все погружены, *взаимодействует* с кварками и электронами: он мешает их ускорению почти так же, как чан с патокой сопротивляется движению шарика для пинг-понга, который туда опущен. И это сопротивление, это торможение мельчайших составляющих вещества даёт вклад в то, что вы ощущаете как массу вашей руки и шара для боулинга, которыми вы размахиваете, или как массу объекта, который вы бросаете, или как массу всего вашего тела, когда вы ускоряетесь в направлении к финишной линии на 100-метровой дистанции. Именно так мы чувствуем океан Хиггса. Силы, которые мы прикладываем тысячи раз в день, чтобы изменить скорость того или иного объекта (чтобы придать ему ускорение), являются силами, которые борются

с сопротивлением океана Хиггса.^{120}

Аналогия с патокой хорошо показывает некоторые детали Хиггсова океана. Чтобы ускорить шарик для пинг-понга, опущенный в патоку, вам нужно толкать его сильнее, чем когда вы играете с ним на теннисном столе, — он будет сопротивляться вашим попыткам изменить его скорость сильнее, чем он делает это вне патоки, так что он ведёт себя так, будто погружение в патоку увеличило его массу. Аналогично, в результате взаимодействий с вездесущим океаном Хиггса элементарные частицы сопротивляются попыткам изменить их скорость — они приобретают массу. Однако аналогия с патокой имеет три особенности, вводящие в заблуждение, которые надо иметь в виду.

Первая особенность состоит в том, что вы всегда можете вытащить шарик для пинг-понга из патоки и увидеть, как уменьшится его сопротивление ускорению. Это неверно для частиц. Мы думаем, что в настоящее время океан Хиггса заполняет всё пространство, так что нет способа удалить частицы из-под его влияния; все частицы имеют массы независимо от того, где они находятся. Вторая особенность состоит в том, что патока сопротивляется любому движению, тогда как поле Хиггса сопротивляется только ускоренному движению. В отличие от движения шарика для пинг-понга через патоку частица, двигаясь через внешнее пространство с постоянной скоростью, не будет замедляться за счёт «трения» о Хиггсов океан. Её движение будет продолжать оставаться неизменным. Только когда мы постараемся разогнать или затормозить частицу, поле Хиггса проявит своё присутствие через силу, которую нам приходится прикладывать. Третья особенность состоит в том, что когда это касается обычной материи, составленной из конгломератов фундаментальных частиц, имеется другой важный источник массы. Кварки, составляющие протоны и нейтроны, удерживаются вместе сильным ядерным взаимодействием: глюоны (частицы — переносчики сильного взаимодействия) перетекают от кварка к кварку, «склеивая» их вместе. Эксперименты показывают, что эти глюоны имеют высокую энергию, а поскольку соотношение Эйнштейна $E = mc^2$ говорит нам, что энергия (E) проявляет себя как масса (m), мы получаем, что глюоны внутри протонов и нейтронов дают существенный вклад в общую массу этих частиц. Так что более точная картина заключается в представлении о патокоподобной силе сопротивления Хиггсова океана, как о дающей массу фундаментальным частицам, таким как электроны и кварки, но когда эти частицы объединяются в составные частицы вроде протонов, нейтронов и атомов,

вступают в игру и другие (хорошо понятные) источники массы.

Физики полагают, что степень сопротивления Хиггсова океана ускорению частицы меняется в зависимости от типа частиц. Это существенно, поскольку все известные виды фундаментальных частиц имеют различные массы. Например, в то время как протоны и нейтроны составлены из двух типов кварков (которые называются *u*-кварки и *d*-кварки: протон состоит из двух *u*-кварков и одного *d*-кварка, а нейтрон — из двух *d*-кварков и одного *u*-кварка), за годы исследований экспериментаторы, используя атомные столкновения, открыли четыре других вида кварков, массы которых охватывают широкий диапазон от 0,0047 до 189 масс протона. Физики думают, что объяснение разнообразия масс заключается в том, что различные типы частиц взаимодействуют с океаном Хиггса с большей или меньшей силой. Если частица движется через океан Хиггса легко, с малым взаимодействием или без такового, то сопротивление будет мало или будет отсутствовать и частица будет иметь малую массу или не будет иметь массы. Хорошим примером является фотон. Фотон движется сквозь океан Хиггса совершенно без сопротивления и поэтому совсем не имеет массы. Наоборот, если частица сильно взаимодействует с океаном Хиггса, она будет иметь более высокую массу. Самый тяжёлый кварк (называемый *t*-кварк) с массой около 350 000 масс электрона взаимодействует с Хиггсовым океаном в 350 000 раз сильнее электрона; он намного труднее ускоряется в океане Хиггса, и в этом причина его большой массы. Если мы сравним массу частицы со степенью известности личности, то океан Хиггса будет подобен толпе папарацци: неизвестные персоны проходят через толпящихся фотографов с лёгкостью, но видные политики и кинозвёзды проталкиваются с большим трудом.^{[\[121\]](#)}

Это даёт прекрасную основу для размышлений о том, почему одна частица имеет массу, отличную от другой, но на сегодняшний день нет фундаментальных объяснений точного способа, которым каждый из известных типов частиц взаимодействует с океаном Хиггса. В результате нет фундаментального объяснения, почему известные частицы имеют именно те массы, которые обнаруживаются экспериментально. Однако большинство физиков думают, что если бы не было океана Хиггса, все фундаментальные частицы были бы подобны фотону и совсем не имели бы массы. Фактически, как мы сейчас увидим, так могло быть в ранние моменты Вселенной.

Объединение в охлаждающейся Вселенной

В то время как газообразный пар конденсируется в жидкую воду при 100°C , а жидкая вода замерзает в твёрдый лёд при 0°C , теоретические изыскания показали, что поле Хиггса конденсируется в ненулевую величину при миллионе миллиардов (10^{15}) градусов. Это почти в 100 млн раз превышает температуру в центре Солнца, и это то значение, до которого, как мы думаем, температура Вселенной упала примерно к одной сотой от миллиардной (10^{-11}) доли секунды после Большого взрыва. До момента 10^{-11} с после Большого взрыва поле Хиггса сильно флуктуировало, но имело нулевую среднюю величину; как вода выше 100°C не может сконденсироваться, так и океан Хиггса при таких температурах не мог сформироваться, поскольку было слишком жарко. Океан немедленно испарился бы. Но без Хиггсова океана сопротивления ускоренному движению, которому подвергаются частицы, не было (папарацци исчезли), что означает, что все известные частицы (электроны, *u*-кварки, *d*-кварки и остальные) имели одинаковую массу: нуль.

Это наблюдение частично объясняет, почему возникновение океана Хиггса описывается как космологический фазовый переход. Фазовые переходы от пара к воде и от воды ко льду сопровождаются двумя важными процессами: происходит качественное изменение во внешнем виде объекта и фазовый переход сопровождается уменьшением симметрии. Мы видим те же две особенности при формировании океана Хиггса. Во-первых, произошли существенные качественные изменения: те типы частиц, которые были безмассовыми, внезапно приобрели ненулевые массы — массы, которые они имеют и сейчас. Во-вторых, это изменение сопровождалось уменьшением симметрии: до формирования океана Хиггса все частицы имели одинаковую — нулевую — массу, что является высокосимметричным состоянием. Если бы вы поменяли массу частиц одного типа на массу частиц другого типа, никто бы этого не заметил, поскольку все массы были одинаковыми. Но после конденсации океана Хиггса массы частиц получили ненулевые — и не равные — величины, так что симметрия между массами была нарушена.

Фактически, уменьшение симметрии при возникновении океана Хиггса является ещё более широким. Выше 10^{15} градусов, когда поле Хиггса ещё не сконденсировалось, безмассовыми являются не только все виды фундаментальных частиц материи, но также, без сопротивления океана Хиггса, безмассовыми являются и все частицы — переносчики сил.

(Сегодня W- и Z-частицы — переносчики слабого ядерного взаимодействия — имеют массы около 86 и 97 масс протона.) И, как впервые было открыто в 1960-е гг. Шелдоном Глэшоу, Стивеном Вайнбергом и Абдусом Саламом, безмассовость частиц всех сил сопровождалась другой, потрясающе красивой симметрией.

В конце 1800-х гг. Максвелл понял, что электричество и магнетизм, хотя они некогда воспринимались как две совершенно разные силы, на самом деле являются различными составляющими одной и той же — электромагнитной силы (см. главу 3). Его труд показал, что электричество и магнетизм дополняют друг друга; они представляют собой инь и ян более симметричного единого целого. Глэшоу, Салам и Вайнберг открыли следующую главу в этой истории объединения. Они поняли, что до того, как возник океан Хиггса, не только все частицы сил имели одинаковую массу — нуль, — но и фотоны, и W- и Z-частицы были идентичны ещё и в существенно другом смысле.^{[\[122\]](#)} Точно так же, как снежинка не меняется при поворотах, которые меняют местами положения её лучей, физические процессы в отсутствие океана Хиггса не будут меняться при взаимозаменах частиц электромагнитных и слабых ядерных сил — при определённых взаимных заменах фотонов и W- и Z-частиц. И так же, как нечувствительность снежинки к поворотам является выражением симметрии (вращательной симметрии), нечувствительность к заменам частиц, переносящих взаимодействия, также отражает симметрию, которая по техническим причинам называется *калибровочной симметрией*. Она имеет глубокие следствия. Поскольку эти частицы являются переносчиками соответствующих сил, симметрия между ними означает, что имеется симметрия и между силами. Следовательно, при достаточно высокой температуре, при такой температуре, которая испарила бы сегодняшний заполненный полем Хиггса вакуум, нет различия между слабой ядерной силой и электромагнитной силой. То есть при достаточно высокой температуре океан Хиггса испаряется; когда это происходит, испаряется и разница между слабыми ядерными и электромагнитными силами.

Глэшоу, Вайнберг и Салам обобщили открытие Максвелла столетней давности, показав, что электромагнитные силы и слабые ядерные силы на самом деле являются частью одной и той же силы. Они *объединили* описание этих двух сил в то, что сейчас называется *электрослабой силой*.

Симметрия между электромагнитными и слабыми ядерными силами не проявляется сегодня, поскольку при охлаждении Вселенной возник Хиггсов океан и, что существенно, фотоны и W- и Z-частицы

взаимодействуют с конденсированным полем Хиггса по-разному. Фотоны проносятся через океан Хиггса так же легко, как второсортный киноартист легко прошёл бы сквозь папарацци, и поэтому остаются безмассовыми. Однако W- и Z-частицы, как Билл Клинтон и Мадонна, с трудом прокладывают себе путь, приобретая массы в 86 и 97 масс протона соответственно. (Замечание: Эта аналогия не соблюдает масштабы.) Вот почему электромагнитные силы и слабые ядерные силы столь различны в мире вокруг нас. Фундаментальная симметрия между ними «нарушена» или скрыта океаном Хиггса.

Это действительно результат, захватывающий дух. Две силы, которые выглядят совсем разными при сегодняшних температурах, — электромагнитная сила, отвечающая за свет, электричество и магнитное взаимодействие, и слабая ядерная сила, отвечающая за радиоактивный распад, — на фундаментальном уровне являются частью одной и той же силы и становятся различными только вследствие ненулевого поля Хиггса, скрывающего симметрию между ними. Таким образом, то, о чём мы обычно думаем как о пустом пространстве (как о вакууме, о пустоте), играет центральную роль в проявлении вещей в мире такими, какие они есть. Только при испарении вакуума, при достаточно высокой температуре, когда поле Хиггса испаряется, т. е. приобретает нулевое среднее значение во всём пространстве, полная симметрия, лежащая в основании законов природы, становится явной.

Когда Глэшоу, Вайнберг и Салам разработали эти идеи, W- и Z-частицы ещё не были открыты экспериментально. Только сильная вера этих физиков в силу теории и красоту симметрии дала им уверенность для продвижения вперёд. Их отвага увенчалась успехом. Через некоторое время W- и Z-частицы были открыты, и электрослабая теория была подтверждена экспериментально. Глэшоу, Вайнберг и Салам разглядели за тем, что лежит на поверхности, — проникли взором сквозь туман пустоты — проявление глубокой и тонкой симметрии, охватывающей две из четырёх сил природы. В 1979 г. им была присуждена Нобелевская премия за успешное объединение слабых ядерных сил и электромагнетизма.

Великое объединение

Когда я был студентом первого курса в колледже, я часто встречался с моим руководителем, физиком Говардом Джорджи. Обычно мне было нечего ему сказать, но это практически и не требовалось. Всегда было что-

то, чем Джорджи хотелось поделиться с заинтересованными студентами. Как-то раз Джорджи был особенно возбуждён, и он быстро и воодушевлённо говорил в течение часа, несколько раз заполнив доску символами и уравнениями. Всё это время я с энтузиазмом кивал головой. Но, откровенно говоря, я не понял ни слова. Годами позже я осознал, что Джорджи говорил мне о планах проверки его открытия, которое было названо *великим объединением*.

Великое объединение ставит вопрос, который естественным образом следует из успеха электрослабого объединения: если две силы природы в ранней Вселенной являлись частью единого целого, то может ли быть, что при ещё более высоких температурах и в ещё более ранние времена совершенно аналогично могут испариться различия между тремя или, возможно, всеми четырьмя силами, создав ещё бóльшую симметрию? Это приводит к интригующей возможности, что на самом деле может быть существует одна единственная фундаментальная сила природы, которая через серию космологических фазовых переходов выкристаллизовалась в четыре кажущиеся различными силы, которые нам известны в настоящее время. В 1974 г. Джорджи и Глэшоу предложили первую теорию, позволяющую пройти часть пути до полного единства. Их *теория великого объединения* вместе с более поздними результатами Джорджи, Хелен Куинн и Вайнберга предполагала, что три из четырёх сил — сильные, слабые и электромагнитные — являлись частью единой силы, когда температура превышала 10 млрд млрд млрд (10^{28}) градусов, — в несколько тысяч миллиардов миллиардов раз больше температуры в центре Солнца, — это экстремальные условия, которые существовали через 10^{-35} с после Большого взрыва. Выше этой температуры, предположили эти физики, фотоны, глюоны сильного взаимодействия, точно так же, как W- и Z-частицы, можно было свободно заменять друг на друга — это более сильная калибровочная симметрия, чем в электрослабой теории, — без каких-либо наблюдаемых последствий. Джорджи и Глэшоу, таким образом, предположили, что при таких высоких энергиях и температурах имеется полная симметрия между тремя видами частиц — переносчиков негравитационных сил, и потому имеется полная симметрия среди трёх негравитационных сил. [{123}](#)

Теория великого объединения Глэшоу и Джорджи также говорит, что мы не наблюдаем эту симметрию в мире вокруг нас, — сильные ядерные силы, которые удерживают вместе протоны и нейтроны в атомных ядрах, кажутся совершенно отличными от слабых или электромагнитных сил, —

поскольку, когда температура упала ниже 10^{28} градусов, в игру вступил другой вид поля Хиггса. Это поле Хиггса называется полем Хиггса великого объединения (или, коротко, *Хиггсом великого объединения*). (Всякий раз, когда названия могут привести к путанице, поле Хиггса, относящееся к электрослабому объединению, называется *электрослабым Хиггсом*). Аналогично случаю его электрослабого родственника, Хиггс великого объединения сильно флуктуирует при температуре выше 10^{28} градусов, но расчёты предполагают, что он конденсируется в ненулевую величину, когда Вселенная охлаждается ниже этой температуры. И, как и с электрослабым Хиггсом, когда возник этот Хиггсов океан великого объединения, Вселенная прошла через фазовый переход с сопровождающим его понижением симметрии. В этом случае, поскольку океан Хиггса великого объединения оказывает различное влияние на глюоны и на другие частицы, сильное взаимодействие отщепилось от электрослабого взаимодействия, создав две различающиеся негравитационные силы там, где раньше была одна. Через крошечную долю секунды, после падения температуры ещё на миллиарды и миллиарды градусов, сконденсировался электрослабый Хиггс, заставив разделиться слабые и электромагнитные силы.

В то время как идея великого объединения красива, она (в отличие от электрослабого объединения) не подтверждена экспериментально. Тем не менее оригинальное предположение Джорджи и Глэшоу предсказывает некий остаточный след этой ранней симметрии Вселенной, который должен быть замечен и сегодня. Это следствие состоит в том, что протоны иногда могут превращаться в другие виды частиц (такие как антиэлектроны и частицы, известные как пионы). Но за многие годы тщательных поисков такого распада протона в сложных подземных экспериментах — именно такой эксперимент Джорджи возбуждённо описывал мне в своём кабинете годы назад — ничего не было найдено; это исключает оригинальное предположение Джорджи и Глэшоу. Однако с тех пор физики разработали вариации этой оригинальной модели, которые ещё не перечёркнуты такими экспериментами; однако ни одна из этих альтернативных теорий пока не подтверждена.

Среди физиков достигнут консенсус, что великое объединение является одной из великих, но ещё нереализованных идей в физике частиц. Поскольку объединение и космологические фазовые переходы оказались столь действенны для электромагнетизма и слабого ядерного взаимодействия, многие чувствуют, что требуется только время, чтобы

другие силы также были собраны в рамках объединённой схемы. Как мы увидим в главе 12, существенное продвижение в этом направлении было достигнуто недавно с использованием другого подхода — *теории суперструн*, — который впервые свёл *все* силы, включая гравитацию, в объединённую теорию, хотя этот подход всё ещё, как принято говорить, находится в стадии интенсивной разработки. Но, что ясно даже сейчас уже только из электрослабой теории, та Вселенная, которую мы видим в настоящее время, обладает лишь остатками ослепительной симметрии, присущей ранней Вселенной.

Возвращение эфира

Концепция нарушения симметрии и её проявление через электрослабое поле Хиггса, несомненно, играют центральную роль в физике частиц и в космологии. Но приведённое выше обсуждение может оставить вас в недоумении по следующему поводу: если Хиггсов океан является невидимым нечто, которое заполняет то, что мы обычно понимаем под пустым пространством, не есть ли это просто другое воплощение давно дискредитированного понятия эфира? Ответ: да и нет. Объяснение: да, конечно, в некотором смысле Хиггсов океан имеет привкус эфира. Подобно эфиру, конденсированное поле Хиггса пропитывает пространство, окружает всех нас, проникает через любой материал и, как неотъемлемое качество пустого пространства (исключая случай, когда мы заново нагреем Вселенную выше 10^{15} градусов, что мы, естественно, не можем сделать), оно переопределяет нашу концепцию пустоты. Но, в отличие от исходного эфира, который был введён как невидимая среда для переноса световых волн примерно так же, как воздух переносит волны звука, океан Хиггса не имеет отношения к движению света; он никак не влияет на скорость света, так что эксперименты на заре XX в., которые исключили представление об эфире благодаря изучению движения света, не затрагивают Хиггсов океан.

Более того, поскольку океан Хиггса никак не влияет на что-либо, движущееся с постоянной скоростью, он не выделяет ни одну систему отсчёта, тогда как эфир делал это. Напротив, даже с Хиггсовым океаном все наблюдатели, движущиеся с постоянной скоростью, остаются в совершенно одинаковом положении, а потому Хиггсов океан не конфликтует со специальной теорией относительности. Конечно, эти наблюдения не доказывают, что Хиггсов океан существует; однако они доказывают, что несмотря на определённое сходство с эфиром поля Хиггса

не конфликтуют с теорией или экспериментом.

Однако если океан поля Хиггса существует, то это должно приводить к другим следствиям, которые будут экспериментально проверяемы в течение следующих нескольких лет. В качестве главного примера можно отметить, что точно так же, как электромагнитные поля состоят из фотонов, поля Хиггса состоят из частиц, которые, что не удивительно, называются частицами Хиггса. Теоретические расчёты показывают, что если имеется пронизанное Хиггсовым океаном пространство, частицы Хиггса должны быть среди осколков при высокоэнергетических столкновениях, которые будут иметь место в Большом адронном коллайдере^[62], гигантском ускорителе, построенном недавно в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве, Швейцария. Грубо говоря, огромные по энергии столкновения протонов лоб в лоб должны быть в состоянии выбить частицу Хиггса из Хиггсова океана примерно так, как мощное подводное столкновение могло бы выбить молекулы H_2O из Атлантического океана. В своё время эти эксперименты должны позволить нам определить, существует ли эта современная форма эфира или она последует за своим более ранним воплощением. Решение этого вопроса имеет критическое значение, поскольку, как мы видели, конденсация полей Хиггса играет глубокую и ключевую роль в нашем современном понимании фундаментальной физики.

Если Хиггсов океан не будет обнаружен, это потребует глобального переосмысления теоретической схемы, которая разрабатывалась более тридцати лет. Но если он найдётся, это событие будет триумфом теоретической физики: это подтвердит силу симметрии для придания правильной формы нашим математическим рассуждениям, когда мы рискуем вторгаться в неизвестное. Помимо этого, подтверждение существования Хиггсова океана сделало бы ещё две вещи. Во-первых, оно могло бы обеспечить прямое подтверждение существования древней эры, когда многие аспекты сегодняшней Вселенной, которые проявляются как различные, были частью симметричного целого. Во-вторых, оно установит, что наше интуитивное понимание пустого пространства — как результата окончательного удаления всего, что мы можем, из области пространства, так что его энергия и температура падают настолько, насколько это возможно, — в течение длительного времени было наивным. Наипустейшее пространство не обязано быть состоянием абсолютной пустоты. Следовательно, в изучении пространства и времени в рамках науки, без обращения к сверхъестественному, мы вполне можем вернуться

к мыслям Генри Мора (глава 2). Для Мора обычная концепция пустого пространства была бессмысленной, поскольку пространство всегда заполнено божественным духом. Для нас обычная концепция пустого пространства также может быть иллюзорной, поскольку пустое пространство, как мы понимаем, может всегда быть заполнено океаном поля Хиггса.

Энтропия и время

Хронология событий, представленная на рис. 9.2, содержит фазовые переходы, которые мы обсуждали в историческом контексте, и потому даёт нам хорошее понимание последовательности событий, через которые прошла Вселенная от Большого взрыва до яйца на вашем кухонном столе. Но критически важная информация всё ещё скрыта в размытом пятне в начале списка. Вспомним, что знание, с чего всё начинается, — откуда берётся порядок в стопке страниц романа *«Война и мир»*, откуда берутся спрессованные молекулы углекислого газа в бутылке колы, как возникает начальное состояние Вселенной при Большом взрыве — является существенным для понимания, как они эволюционируют. Энтропия может возрастать, только если ей есть куда расти. Энтропия может возрастать, только если она начинала с низкой величины. Если страницы романа *«Война и мир»* начинаются с полного беспорядка, дальнейшие подбрасывания просто будут оставлять их в беспорядке; если Вселенная началась с полностью разупорядоченного высокоэнтропийного состояния, дальнейшая космическая эволюция будет просто сохранять этот беспорядок.

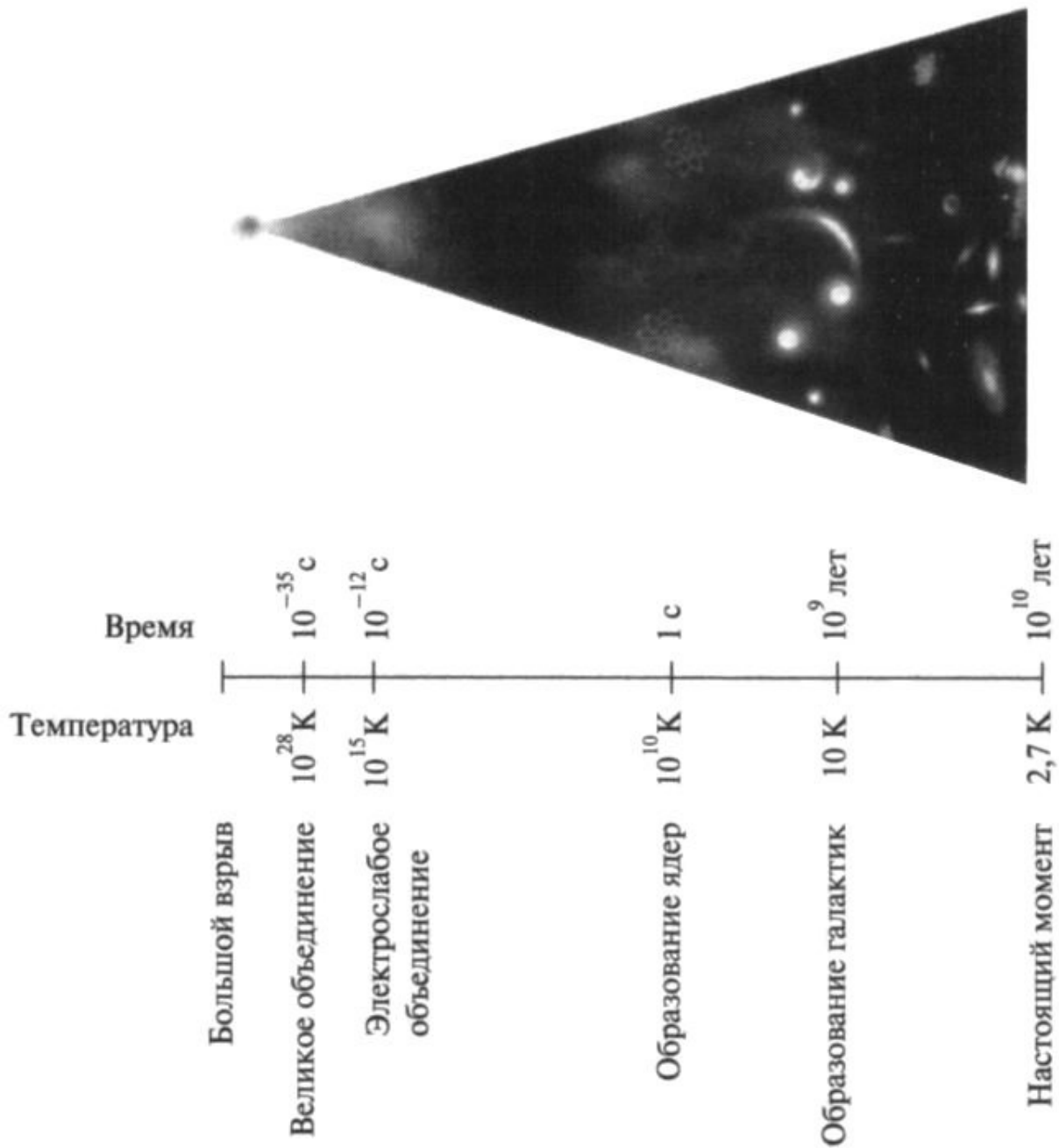


Рис. 9.2. Временная ось, схематически иллюстрирующая стандартную космологическую модель Большого взрыва

История, показанная на рис. 9.2, очевидно, не является хроникой непрерывного и неизменного беспорядка. Хотя отдельные симметрии терялись при космических фазовых переходах, общая энтропия Вселенной неуклонно возрастала. Следовательно, в начале Вселенная должна была

быть высокоупорядоченной. Этот факт позволяет нам связать направление «вперёд» во времени с направлением возрастания энтропии, но нам всё ещё необходимо объяснить невероятно низкую энтропию — невероятно высокое состояние однородности — в только что рождённой Вселенной. Это требует, чтобы мы продвинулись назад, вглубь, ещё дальше и попытались больше понять о том, что было в начале, — в размытом пятне на рис. 9.2 — задача, к которой мы сейчас приступаем.

Глава 10. Препарирование взрыва

Что взорвалось?

Общее заблуждение состоит в том, что теория Большого взрыва является теорией возникновения космоса. Это не так. Большой взрыв — это теория, частично описанная в двух предыдущих главах, которая обрисовывает космическую эволюцию спустя доли секунды после чего-то, что привело Вселенную к существованию, но она *совсем ничего не говорит о самом времени «нуль»*. А поскольку, в соответствии с теорией Большого взрыва, сам взрыв есть то, что предполагается произошедшим в начале, Большой взрыв не включает сам момент взрыва. Теория Большого взрыва ничего не говорит нам о том, что взорвалось, почему взорвалось, как оно взорвалось или взорвалось ли оно вообще на самом деле.^{124} Фактически, если вы на секунду задумаетесь об этом, вы обнаружите, что Большой взрыв предстаёт перед нами совершенно загадочным. При чудовищных плотностях материи и энергии, характеризующих ранние моменты Вселенной, гравитация была силой, доминирующей над всеми другими силами. Но гравитация — притягивающая сила. Она заставляет вещи объединяться. Что же могло соответствовать расталкивающей силе, которая подтолкнула Вселенную к расширению? Казалось бы, какая-то мощная отталкивающая сила должна была играть критическую роль во время взрыва, но какая из природных сил могла бы это быть?

Много десятилетий этот самый основной из всех космологических вопросов оставался без ответа. Затем в 1980-е гг. в блистательной и новой форме было возрождено одно старое наблюдение Эйнштейна, дав толчок тому, что стало известно как инфляционная космология. И это открытие, наконец, отдало главную роль во взрыве достойной этого силе: гравитации. Это удивительно, но физики обнаружили, что в подходящих условиях гравитация может быть отталкивающей и, в соответствии с теорией, именно такие условия преобладали в течение самых ранних моментов космической истории. В течение интервала времени, для которого наносекунда могла бы показаться вечностью, ранняя Вселенная обеспечивала арену, на которой гравитация проявляла свою отталкивающую сторону, с неумолимой свирепостью расталкивая все области пространства друг от друга. Отталкивающее действие гравитации было столь мощным, что не только предопределило взрыв, но оно дало больше — намного больше, — чем кто бы то ни было раньше представлял.

Благодаря инфляции ранняя Вселенная расширилась в ошеломляющее число раз больше по сравнению с тем, что предсказывает стандартная теория Большого взрыва, увеличив нашу космологическую перспективу до такой степени, что открытие последнего столетия, согласно которому наша Галактика не более чем одна среди сотен миллиардов, стало казаться совершенно незначительным. [{125}](#)

В этой и следующей главе мы обсуждаем инфляционную космологию. Мы увидим, что она обеспечивает «интерфейс» для стандартной модели Большого взрыва, предлагая критически важные модификации к утверждениям стандартной теории о событиях, происходивших в самые ранние моменты Вселенной. При этом инфляционная космология решает ключевые проблемы, которые находятся вне пределов досягаемости стандартной модели Большого взрыва, даёт ряд предсказаний, которые были экспериментально проверены и в недалёком будущем продолжат экспериментально тестироваться, и, наверное, самое поразительное, показывает, как квантовые процессы, благодаря космологическому расширению, могут впечатать крошечные морщины в ткань пространства, оставив видимый след в ночном небе. И, помимо этих успехов, инфляционная космология, подводя нас ближе чем когда-либо к объяснению стрелы времени, даёт возможность понять, как в ранней Вселенной могла образоваться чрезвычайно низкая энтропия.

Эйнштейн и отталкивающая гравитация

После внесения последних штрихов в общую теорию относительности в 1915 г. Эйнштейн применил свои новые уравнения к рассмотрению ряда проблем. Среди них была давняя загадка, почему с помощью уравнений Ньютона не удаётся оценить так называемую прецессию перигелия орбиты Меркурия — наблюдаемый факт, что Меркурий не прочерчивает каждый раз один и тот же путь, обращаясь вокруг Солнца: вместо этого каждая следующая орбита немного поворачивается относительно предыдущей. Когда Эйнштейн провёл расчёты орбиты со своими новыми уравнениями, он получил точное наблюдаемое значение прецессии перигелия, и найденный им результат был настолько волнующим, что вызвал у него учащённое сердцебиение. [{126}](#) Эйнштейн также применил общую теорию относительности к вопросу о том, насколько сильно за счёт кривизны пространства-времени будет изгибаться траектория света далёкой звезды, когда свет проходит мимо Солнца на своём пути к Земле. В 1919 г. две

команды астрономов — одна на острове Принсипи у западного побережья Африки, другая в Бразилии — проверили это предсказание во время солнечного затмения путём сравнения пути света от звёзд, который приходил, почти касаясь поверхности Солнца (именно такой свет наиболее подвержен отклонению за счёт присутствия Солнца, и только во время затмения он может быть видим), с фотографиями, сделанными, когда движение по орбите помещало Землю между Солнцем и теми же звёздами, почти уничтожая влияние гравитации Солнца на траекторию звёздного света. Сравнение дало угол отклонения света, который снова подтвердил вычисления Эйнштейна. Когда эти результаты попали в прессу, Эйнштейн стал известен на весь мир за одну ночь. С общей теорией относительности Эйнштейну, по правде говоря, здорово повезло.

Тем не менее, несмотря на впечатляющие успехи общей теории относительности, в течение нескольких лет после того, как он впервые применил свою теорию к наиболее вызывающей из всех проблем — к пониманию Вселенной в целом, — Эйнштейн абсолютно отказался принять выводы, которые следовали из математики. Ещё до работ Фридмана и Леметра, обсуждавшихся в главе 8, Эйнштейн понял, что из уравнения общей теории относительности следует, что Вселенная не может быть статической; ткань пространства может растягиваться или сжиматься, но она не может сохранять фиксированный размер. Это означало, что Вселенная могла иметь определённое начало, когда ткань пространства была максимально сжата, и может даже иметь определённый конец. Эйнштейн упрямо отказывался от этих следствий общей теории относительности, поскольку он и все остальные «знали», что Вселенная бесконечна и на самых больших масштабах неподвижна и неизменна. Поэтому несмотря на красоту и успешность общей теории относительности Эйнштейн снова взялся за свой блокнот и попытался внести изменения в уравнения, которые бы позволили Вселенной соответствовать преобладающему предубеждению. У него это долго не получалось. В 1917 г. он добился цели путём введения нового члена в уравнения общей теории относительности: *космологической постоянной*.
[{127}](#)

Стратегию Эйнштейна при введении этой модификации нетрудно понять. Гравитационная сила между любыми двумя объектами, являются ли они бейсбольными мячами, планетами, звёздами, кометами или чем хотите, является притягивающей, и в итоге гравитация постоянно действует так, чтобы сдвинуть объекты в направлении друг к другу. Гравитационное притяжение между Землёй и танцором, прыгающим вверх, заставляет

танцора замедлиться, достигнуть максимальной высоты, а затем направиться обратно вниз. Если хореограф задумал бы статическую конфигурацию, в которой танцор повис бы в воздухе, то между танцором и Землёй должна была бы быть введена отталкивающая сила, которая в точности уравнивала бы их гравитационное притяжение: статическая конфигурация может возникнуть только тогда, когда имеется точная взаимная компенсация притяжения и отталкивания. Эйнштейн осознал, что точно такие же рассуждения применимы ко всей Вселенной. Точно так же, как притяжение гравитации замедляет подъём танцора, оно замедляет и расширение пространства. И точно так же, как танцор не может замереть, и продолжать парить на фиксированной высоте над полом без дополнительной отталкивающей силы, компенсирующей обычное гравитационное притяжение, пространство не может быть статическим, оно не может «парить», сохраняя фиксированный общий размер, без наличия некоторой компенсирующей отталкивающей силы. Эйнштейн ввёл космологическую постоянную потому, что он выяснил, что с этим новым членом, включённым в уравнения, гравитация может обеспечить именно такую отталкивающую силу.

Но какой физический смысл имеет этот математический объект? Что такое космологическая постоянная, из чего она сделана, и каким образом она действует против обычного притяжения гравитации и оказывает отталкивающее действие? Современное прочтение работы Эйнштейна — то, что восходит к Леметру, — интерпретирует космологическую константу как экзотическую форму энергии, которая однородно и равномерно заполняет всё пространство. Я говорю «экзотическую», поскольку анализ Эйнштейна не определяет, откуда эта энергия может взяться, и, как мы скоро увидим, математическое описание, которое для неё использовал Эйнштейн, гарантирует, что эта энергия не может состоять из чего-то привычного вроде протонов, нейтронов, электронов или фотонов. Сегодня физики, когда обсуждают смысл эйнштейновской космологической постоянной, используют фразы вроде «энергия самого пространства» или «тёмная энергия», поскольку, если космологическая постоянная существует, пространство должно быть заполнено прозрачным, аморфным чем-то, что вы не можете видеть непосредственно; пространство, заполненное космологической постоянной, будет всё ещё выглядеть тёмным. (Это напоминает старое понятие эфира и новое понятие поля Хиггса, которое имеет ненулевую величину во всём пространстве. Последнее сходство является не просто случайным совпадением, поскольку между космологической постоянной и полями Хиггса имеется важная

связь, до которой мы скоро доберёмся.) Но даже без точного определения происхождения или сущности космологической постоянной, Эйнштейн смог найти её приложения к физике гравитации, и полученный им результат весьма примечателен.

Чтобы понять его, необходимо познакомиться с одной особенностью общей теории относительности, которую нам надо сейчас обсудить. В ньютоновском подходе к гравитации сила притяжения между двумя объектами зависела только от двух факторов: их масс и расстояния между ними. Чем массивнее объекты и чем ближе они друг к другу, тем больше взаимное гравитационное притяжение. В общей теории относительности ситуация в основном такая же, но уравнения Эйнштейна показывают, что учёт только масс объектов в ньютоновской теории был слишком ограниченным. В соответствии с общей теорией относительности в силу гравитационного поля вносит вклад не только масса (и расстояние). Участвуют также *энергия* и *давление*. Это важно, поэтому рассмотрим подробнее, что это означает.

Представьте, что сейчас двадцать пятое столетие, и вы заключены в Замке разума, который представляет собой новейший эксперимент Департамента коррекции, предназначенный для перевоспитания преступников из среды «белых воротничков», основанного на их собственных способностях. Каждому осуждённому даётся загадка, и они могут вернуть себе свободу, только разгадав её. Парень в соседней с вами камере вынужден разгадывать, почему «Остров Джиллигана»^[63] неожиданно снова был показан в двадцать втором столетии и с тех пор стал самым популярным шоу, — так что ему, вероятно, придётся называть Замок своим домом ещё некоторое время. Ваша загадка проще. Вам даны два идентичных твёрдых золотых кубика — они одинакового размера, и каждый изготовлен из одинакового количества золота. Ваша задача — найти способ заставить кубики давать различные показания при измерении их веса с помощью неподвижных и чрезвычайно точных весов, при одном условии: вам нельзя изменять количество материи в каждом кубике, т. е. их нельзя рубить, разбивать, паять, царапать и т. д. Если бы эту загадку поставили перед Ньютоном, он бы немедленно заявил, что она не имеет решения. В соответствии с законами Ньютона одинаковые количества золота означают одинаковые массы. И поскольку каждый кубик остаётся тем же самым, гравитационное притяжение Земли для них будет идентичным. Ньютон пришёл бы к заключению, что два кубика должны показывать одинаковый вес без всяких если, и или но.

Однако с вашими институтскими знаниями XXV в. общей теории

относительности вы разглядите способ решить эту загадку. Общая теория относительности говорит, что сила гравитационного притяжения между двумя объектами зависит не только от их масс^{128} (и расстояния между ними), но также от любых и всех дополнительных вкладов в полную *энергию* каждого объекта. А мы ничего не говорили о температуре золотых кубиков. Температура — это мера того, насколько быстро в среднем атомы золота, из которых состоит каждый кубик, движутся туда-сюда, — т. е. она показывает, насколько энергичны атомы (она отражает их *кинетическую* энергию). Таким образом, вы понимаете, что если нагреть один из кубиков, его атомы будут более энергичными, так что его вес будет чуть больше, чем у более холодного кубика. Этого факта Ньютон не знал (увеличение температуры на 10 градусов Цельсия приведёт к увеличению веса кубика из одного фунта золота примерно на миллионную от миллиардной доли фунта, так что эффект крайне мал), и с этим решением загадки вас должны будут освободить из Замка.

Но нет. Поскольку ваше преступление было особенно тяжким, в последнюю минуту перед вашим освобождением коллегия приняла решение, что вы должны разгадать вторую загадку. Вам даны две одинаковые старинные игрушки «Джек в коробочке». Ваша новая задача — найти способ сделать так, чтобы каждая имела различный вес. Но на этот раз зам не только запрещено изменять количество массы каждого объекта, но и нельзя изменять их температуру. Опять, если эту загадку дать Ньютону, ему пришлось бы смириться с пожизненным заточением в Замке. Поскольку игрушки имеют одинаковые массы, он бы пришёл к выводу, что их веса идентичны и загадка неразрешима. Но вновь ваши знания общей теории относительности вас спасут: у одной из игрушек вы сожмёте пружину, впихнув Джека под закрытую крышку, в то время как в другой игрушке вы оставите Джека снаружи. Почему это решит проблему? Сжатая пружина имеет больше энергии, чем не сжатая; вы затратили энергию, чтобы сжать пружину, и вы можете видеть подтверждение вашей работы, поскольку сжатая пружина оказывает давление, заставляя крышку игрушки немного выгибаться наружу. И опять, в соответствии с Эйнштейном, *любая* дополнительная энергия связана с гравитацией, вызывая дополнительный вес. Таким образом, закрытый «Джек в коробочке» со сжатой пружиной, оказывающей давление наружу, весит чуточку больше, чем открытый «Джек в коробочке» с разжатой пружиной. Это то решение, которое могло бы спасти Ньютона, и благодаря ему вы получаете долгожданную свободу.

Решение второй загадки указывает на тонкое, но очень важное свойство общей теории относительности, на котором мы сосредоточимся. В

своей статье, представляющей общую теорию относительности, Эйнштейн математически показал, что гравитационная сила зависит не только от массы и не только от энергии (такой как тепло), но также и от любого давления. И в этом заключается та существенная физика, которая нам необходима, если мы хотим понять космологическую постоянную. И вот почему. Давление, направленное наружу, подобное давлению, оказываемому сжатой пружиной, называется *положительным давлением*. Довольно естественно, что положительное давление даёт положительный вклад в гравитацию. Но, и это критически важный момент, существуют ситуации, когда давление в некоторой области, в отличие от массы и полной энергии, может быть *отрицательным*, означая, что давление всасывает внутрь, вместо того чтобы выталкивать наружу. Такое отрицательное давление может привести к экстраординарным следствиям с точки зрения общей теории относительности: *в то время как положительное давление даёт вклад в обычное гравитационное притяжение, отрицательное давление вносит вклад в «отрицательную» гравитацию, т. е. в гравитационное отталкивание.*^{[\[129\]](#)}

Этим ошеломляющим открытием общая теория относительности Эйнштейна пробивает брешь в более чем двухсотлетней уверенности, что гравитация всегда является притягивающей силой. Планеты, звёзды и галактики, как правильно показал Ньютон, создают гравитационное притяжение. Но когда давление играет важную роль (для обычной материи при повседневных условиях вклад давления в гравитацию пренебрежимо мал) и, в особенности, когда давление отрицательно (для обычной материи вроде протонов и электронов давление положительно, из чего следует, что космологическая константа не может быть составлена из чего-то привычного), оно даёт вклад в гравитацию, который бы шокировал Ньютона. *Это вклад в отталкивание.*

Этот результат является центральным для большей части последующего изложения и легко может быть неправильно понят, поэтому позвольте мне подчеркнуть один существенный момент. Гравитация и давление являются двумя связанными, но отдельными понятиями в этой истории. Давления или, более точно, разности давлений могут создавать свои собственные, негравитационные силы. Когда вы ныряете под воду, ваши барабанные перепонки могут чувствовать разницу давлений, создаваемых водой, давящей на них снаружи, и воздухом, давящим на них изнутри. Всё это верно. Но суть вопроса, о котором мы говорим сейчас, рассматривая давление и гравитацию, совсем в другом. В соответствии с общей теорией относительности давление может косвенно оказывать

другое воздействие — гравитационное, поскольку давление вносит вклад в гравитационное поле. Давление, подобно массе и энергии, является источником гравитации. И, что примечательно, если давление в некоторой области отрицательно, то оно вносит вклад в гравитационное поле, пронизывающее эту область, в виде отталкивания, но не в виде гравитационного притяжения.

Это значит, что когда давление отрицательно, имеется конкуренция между обычной притягивающей гравитацией, возникающей из обычной массы и энергии, и непривычной отталкивающей гравитацией, возникающей из отрицательного давления. Если отрицательное давление в некоторой области имеет достаточную величину, отталкивающая гравитация будет доминировать; гравитация будет расталкивать вещи в стороны, а не притягивать их друг к другу. Именно тут космологическая константа появляется на сцене. Наличие этого члена, который Эйнштейн добавил в уравнения общей теории относительности, подразумевает, что пространство однородно заполнено энергией, но, что важно, уравнения показывают, что эта энергия имеет однородное отрицательное давление. И, что ещё более важно, гравитационное отталкивание отрицательного давления космологической постоянной больше гравитационного притяжения её положительной энергии, так что отталкивающая гравитация побеждает в этом соревновании: *космологическая постоянная создаёт общую расталкивающую гравитационную силу.*^{[\[130\]](#)}

Для Эйнштейна это было как раз то, что ему было нужно. Обычная материя и излучение, распределённые по Вселенной, вызывают притягивающую гравитационную силу, вынуждая каждую область пространства *притягиваться* к каждой другой. Новое космологическое слагаемое, которое он также представлял однородно распределённым по Вселенной, распространяет отталкивающую гравитационную силу, заставляя каждую область пространства отталкиваться от каждой другой. Эйнштейн обнаружил, что точно выбрав величину космологической постоянной, он мог бы обычную притягивающую гравитационную силу точно уравновесить вновь открытой отталкивающей гравитацией, что дало бы статическую Вселенную.

Более того, поскольку новая отталкивающая гравитационная сила возникает из энергии и давления самого пространства, Эйнштейн обнаружил, что эта сила кумулятивна; сила становится больше при больших пространственных расстояниях, поскольку большее промежуточное пространство означает большее отталкивание. Эйнштейн показал, что на расстояниях порядка Земли или всей Солнечной системы

новая отталкивающая гравитационная сила, неизмеримо мала. Она становится важной только на много больших, космологических расстояниях, тем самым оставляя в силе как ньютоновскую теорию, так и его собственную общую теорию относительности, когда они применяются «ближе к дому». Короче говоря, Эйнштейн нашёл решение, при котором и волки сыты, и овцы целы. Он смог сохранить всю привлекательность и все экспериментально подтверждённые свойства общей теории относительности, одновременно наслаждаясь вечной неподвижностью неизменного космоса, который ни расширяется, ни сжимается.

Такой результат, несомненно, позволил Эйнштейну вздохнуть с облегчением. Какие сердечные муки он должен был испытывать, когда десятилетие тяжелейших исследований, которое он посвятил формулировке общей теории относительности, привело бы в итоге к теории, которая была несовместима со статической Вселенной, которую видит каждый, кто вглядывается в ночное небо. Но, как мы видели, дюжину лет спустя история сделала резкий поворот. В 1929 г. Хаббл показал, что поверхностный взгляд на небо может вводить в заблуждение. Его систематические наблюдения показали, что Вселенная *не* статична. Она *действительно* расширяется. Если бы Эйнштейн поверил исходным уравнениям общей теории относительности, он мог бы предсказать расширение Вселенной более чем за десять лет до того, как оно было открыто путём наблюдений. Это определённо должно быть поставлено в ряд величайших открытий — это может быть *самым* великим открытием всех времён. После ознакомления с результатами Хаббла Эйнштейн пожалел о том дне, когда он подумал о космологической постоянной, и он убрал её из уравнений общей теории относительности. Он хотел, чтобы все забыли весь этот прискорбный эпизод, и на несколько десятилетий все действительно его забыли.

Однако в 1980-х гг. космологическая постоянная снова вышла на сцену в совершенно новой форме и указала путь к одному из наиболее судьбоносных переворотов в космологическом мышлении со времён, когда человек впервые заинтересовался космологией.

О прыгающих лягушках и переохлаждении

Поймав взглядом летящий вверх бейсбольный мяч, вы можете используя закон тяготения Ньютона (или более утончённые уравнения Эйнштейна) предсказать его последующую траекторию. И, если вы

проведёте требуемые вычисления, вы получите полное понимание того, как движется мяч. Однако открытым остаётся вопрос: кто или что подбросило мяч вверх вначале? Как мяч приобрёл начальное направленное вверх движение, которое вы затем можете математически описать? В этом простом примере, немного поразмыслив, можно найти ответ. Но более сложная версия аналогичного вопроса состоит в том, чтобы объяснить начало расширения Вселенной с использованием общей теории относительности.

Уравнения общей теории относительности, как впервые было показано Эйнштейном, датским физиком Виллемом де Ситтером и впоследствии Фридманом и Леметром, допускают расширяющуюся Вселенную. Но, так же как уравнения Ньютона ничего не говорят нам о том, почему началось движение мяча вверх, уравнения Эйнштейна ничего не говорят о том, как началось расширение Вселенной. Многие годы космологи говорили о начальном расширении пространства как о чём-то данном и необъяснимом, и просто разрабатывали уравнения, исходя из этого. Именно это я имел в виду, когда ранее говорил, что теория Большого взрыва молчит о самом взрыве.

Так дела обстояли до той важной ночи в декабре 1979 г., когда Алан Гут, работавший в Стэнфордском линейном ускорительном центре (сейчас он профессор Массачусетского технологического института), показал, что мы можем гораздо больше. Намного больше. Хотя остались детали, которые и сегодня, более чем через два десятилетия, ещё требуют своего обсуждения, Гут сделал открытие, которое разорвало это молчание, снабдив Большой взрыв взрывом как таковым, и который оказался больше, чем кто-либо мог ожидать.

Гут не был специалистом-космологом. Его специальностью была физика частиц, и в конце 1970-х гг. вместе с Генри Таем из Корнельского университета он изучал различные модели полей Хиггса в теориях великого объединения. Вспомним из обсуждения предыдущей главы о спонтанном нарушении симметрии, что поле Хиггса вносит минимально возможный вклад в энергию в некоторой области пространства, когда величина поля имеет специальное ненулевое значение (которое зависит от точной формы чаши его потенциальной энергии). В ранней Вселенной, когда температура была необычайно высока, мы обсуждали, как величина поля Хиггса сильно флуктуирует от одного значения к другому, подобно прыжкам лягушки в горячей металлической чаше, которая жжёт ей лапки, но когда Вселенная остыла, поле Хиггса скатилось на дно чаши к величине, которая минимизировала его энергию.

Гут и Тай изучали причины, по которым поле Хиггса может задержаться на пути к конфигурации с наименьшей энергией (к жёлобу в чаше на рис. 9.1в). Если мы применим аналогию с лягушкой к вопросу, который интересовал Гута и Тая, его можно сформулировать так: что если лягушке в одном из своих первых прыжков, когда чаша начала охлаждаться, случится приземлиться на центральной площадке? И что если, когда чаша продолжит охлаждаться, лягушка задержится на центральном плато (неторопливо поедая червяков), вместо того чтобы соскользнуть вниз в жёлоб чаши? Или, в физических терминах, что если величина флуктуирующего поля Хиггса приземлится на центральном возвышенном плато энергетической чаши и останется там, когда Вселенная продолжит охлаждаться? Если это происходит, физики говорят, что поле Хиггса *переохлаждено*. Это означает, что хотя температура Вселенной упала до уровня, когда вы ожидаете, что величина поля Хиггса должна приблизиться к низкоэнергетическому жёлобу, поле остаётся захваченным в высокоэнергетической конфигурации. (Это напоминает воду высокой чистоты, которая может быть переохлаждена до температуры ниже 0°C, когда ожидается, что она превратится в лёд, но тем не менее всё ещё останется жидкостью, поскольку образование льда требует малых примесей, вокруг которых могут начать расти кристаллы.)

Гут и Тай заинтересовались этим сценарием, поскольку их расчёты наводили на мысль, что это может иметь отношение к проблеме, с которой исследователи столкнулись в попытках реализовать различные сценарии великого объединения (проблема магнитного монополя).^[131] Но Гут и Тай осознали, что отсюда вытекают и другие возможности. Они предположили, что энергия, связанная с переохлаждённым полем Хиггса, — вспомним, что высота поля представляет его энергию, так что поле имеет нулевую энергию, только если его величина лежит на дне в жёлобе чаши, — может влиять на расширение Вселенной. В начале декабря 1979 г. Гут пошёл дальше в этом же направлении, и вот что он обнаружил.

Поле Хиггса, которое удерживается на плато, не только наполняет пространство энергией, но, что критически важно, Гут понял, что оно также даёт вклад в однородное *отрицательное давление*. Фактически он нашёл, что в том, что касается энергии и давления, поле Хиггса, которое удерживается на плато, имеет такие же свойства, как и космологическая постоянная: оно наполняет пространство энергией и отрицательным давлением в точности в той же пропорции, как и космологическая постоянная. Так Гут открыл, что переохлаждённое поле Хиггса сильно влияет на расширение пространства: подобно космологической постоянной

оно является носителем отталкивающей гравитационной силы, которая заставляет пространство расширяться.^{[\[132\]](#)}

Здесь, поскольку вы уже знакомы с отрицательным давлением и отталкивающей гравитацией, вы можете подумать: да, это прекрасно, что Гут нашёл особый физический механизм для реализации идеи Эйнштейна о космологической постоянной, ну и что из того? Что тут особенного? Концепция космологической постоянной давно уже отброшена. Её введение в физику было не чем иным, как заблуждением Эйнштейна. Почему повторное открытие чего-то, что дискредитировало себя более шести десятилетий назад, вызвало такое возбуждение?

Инфляция

А вот почему. Хотя переохлаждённое поле Хиггса обладает определёнными свойствами космологической постоянной, Гут понял, что они не абсолютно идентичны. Напротив, имеется два ключевых различия, которые всё меняют.

Во-первых, в то время как космологическая постоянная является константой — она не меняется со временем, так что она обеспечивает постоянное, неизменное отталкивание, — переохлаждённое поле Хиггса не обязательно должно быть постоянным. Подумаем о лягушке, усевшейся на выпуклость в центре чаши на рис. 10.1а. Она может сидеть там некоторое время, но рано или поздно случайный прыжок — прыжок, вызванный не тем, что чаша горячая (она уже остыла), а скорее тем, что лягушка неугомонная, — столкнёт лягушку с выпуклости, после чего она соскользнёт вниз к низшей точке чаши, как показано на рис. 10.1б. Поле Хиггса может вести себя аналогично. Его величина во всём пространстве может застрять на центральном плато энергетической чаши, в то время как температура упадёт слишком низко, чтобы вызвать существенное тепловое воздействие на поле. Но квантовые процессы будут вызывать хаотические скачки величины поля Хиггса, и достаточно большой скачок сбросит его с плато, позволив его энергии и давлению релаксировать к нулю.^[133]

[illegible]

Андреасом Альбрехтом в университете Пенсильвании, нашли способ для поля Хиггса релаксировать к нулевой энергии и давлению во всём пространстве даже более эффективно и существенно более однородно (при этом разрешив некоторые технические проблемы, свойственные изначальному предложению Гута).^[134] Они показали, что если чаша потенциальной энергии более гладкая и более пологая, как на рис. 10.2, то квантовые скачки могут не потребоваться: величина поля Хиггса быстро скатится в жёлоб, как мяч с горки. Итог таков: если поле Хиггса действовало подобно космологической постоянной, это продолжалось лишь крошечное мгновение.

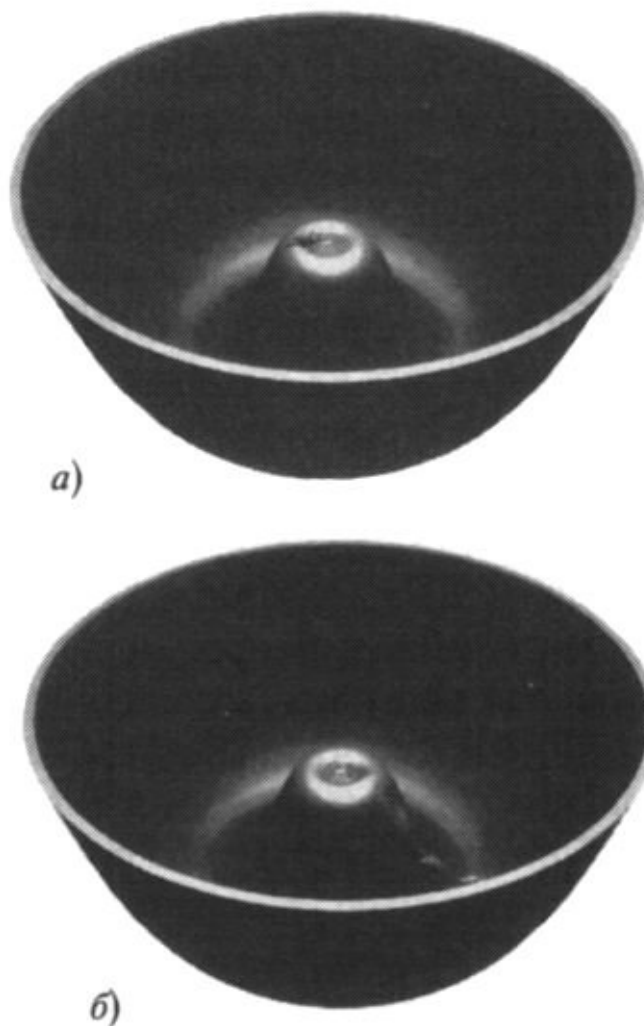


Рис. 10.1. (а) Переохлаждённое поле Хиггса — это поле, величина которого захвачена на высокоэнергетическом плато энергетической чаши, как лягушка на выпуклости в центре чаши. (б) В типичном случае переохлаждённое поле Хиггса быстро

найдёт путь вниз с плато и скатится к величине с меньшей энергией, как лягушка, спрыгнувшая с выпуклости

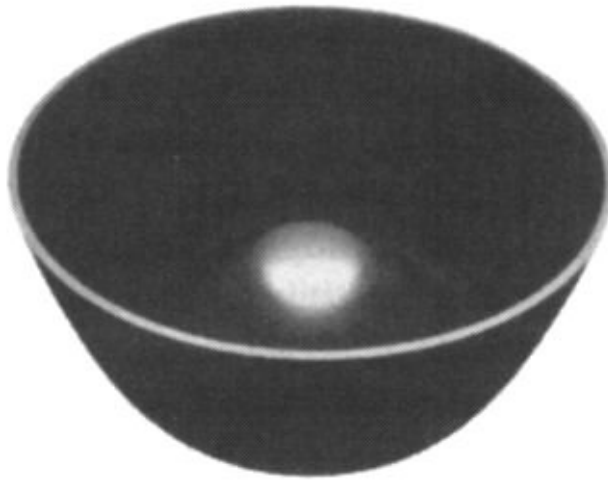


Рис. 10.2. Более гладкая и более пологая выпуклость позволяет величине поля Хиггса скатиться вниз в жёлоб с нулевой энергией легче и более однородно во всём пространстве

Второе отличие заключается в том, что, в то время как Эйнштейн произвольно подобрал значение космологической постоянной — количество энергии и отрицательного давления, которое она вносит в каждый объём пространства (так чтобы её отталкивающая сила в точности компенсировала силу притяжения, возникающую от обычной материи и излучения в космосе), Гут смог вычислить вклад в энергию и отрицательное давление от полей Хиггса, которые изучали они с Таем. И ответ, который он получил, был более чем в 10^{100} (единица и сто нулей) раз больше, чем величина, выбранная Эйнштейном. Эта величина, очевидно, огромна, так что отталкивание, которое создаёт отталкивающая гравитация поля Хиггса, *грандиозно* по сравнению с тем, что Эйнштейн исходно имел в виду для космологической постоянной.

Теперь, если мы объединим эти два наблюдения — что поле Хиггса будет находиться на плато в высокоэнергичном состоянии с отрицательным давлением только микроскопическое мгновение и что пока оно находится на плато, генерируемое им отталкивание будет гигантским, — что мы получим? Как осознал Гут, мы получим феноменальный кратковременный взрыв. Другими словами, мы получим в точности то, чего не хватает теории Большого взрыва: взрыв, и при этом большой. Вот почему открытие Гута

так воодушевляет.^{[\[135\]](#)}

Таким образом, космологическая картина, возникающая благодаря прорыву Гута, состоит в следующем. Очень давно, когда Вселенная была чудовищно плотной, носителем её энергии было поле Хиггса, имеющее значение, далёкое от низшей точки в его потенциальной чаше. Чтобы отличать это специальное поле Хиггса от других (таких как электрослабое поле Хиггса, отвечающее за появление массы у обычных семейств частиц, или поле Хиггса, которое возникает в теориях великого объединения)^{[\[136\]](#)} его обычно называют полем *инфлатона*. Вследствие своего отрицательного давления поле инфлатона генерировало гигантское гравитационное отталкивание, которое растаскивало каждую область пространства прочь от любой другой; на языке Гута инфлатон вызвал во Вселенной *инфляцию* (раздувание). Отталкивание длилось всего около 10^{-35} с, но оно было столь мощным, что даже за этот краткий момент Вселенная раздулась в гигантское число раз. В зависимости от деталей точной формы потенциальной энергии поля инфлатона Вселенная могла легко расшириться в 10^{30} , 10^{50} , 10^{100} раз или больше.

Эти числа потрясают. Коэффициент расширения 10^{30} — консервативная оценка — подобен увеличению размера молекулы ДНК приблизительно до размера нашей Галактики (Млечного Пути), и всё это за временной интервал много короче, чем миллиардная от миллиардной от миллиардной доли от времени, необходимого, чтобы моргнуть глазом. Для сравнения, даже эта консервативная оценка в миллиарды и миллиарды раз больше расширения, которое могло бы возникнуть в соответствии со стандартной теорией Большого взрыва за то же время, и это превышает полный фактор расширения, который был достигнут за последующие 14 млрд лет! Во многих моделях инфляции, в которых рассчитанный фактор расширения намного больше, чем 10^{30} , результирующая пространственная протяжённость Вселенной настолько велика, что та область, которую мы можем видеть даже в самые мощные телескопы, является только крохотным кусочком всей Вселенной. В соответствии с этими моделями свет, испущенный в подавляющем большинстве областей Вселенной, до сих пор не смог достигнуть нас, и большая часть его не появится ещё очень долго после того, как исчезнут Солнце и Земля. Если весь космос уменьшить до размеров Земли, то часть, доступная нашим наблюдениям, будет намного меньше песчинки.

Примерно через 10^{-35} с после начала раздувания поле инфлатона нашло путь вниз с высокоэнергетического плато, и его величина во всём

пространстве соскользнула на дно чаши, исключив отталкивание. И когда поле инфлатона скатилось вниз, оно передало свой запас энергии на рождение обычных частиц материи и излучения — подобно тому как туман оседает на траву утренней росой, — которые однородно заполнили расширяющееся пространство.^[137] С этого момента история становится по существу историей стандартной теории Большого взрыва: пространство вследствие взрыва продолжает расширяться и охлаждаться, позволяя частицам материи собираться в структуры вроде галактик, звёзд и планет, которые медленно распространяются во Вселенной, которую мы видим в настоящее время, как показано на рис. 10.3.

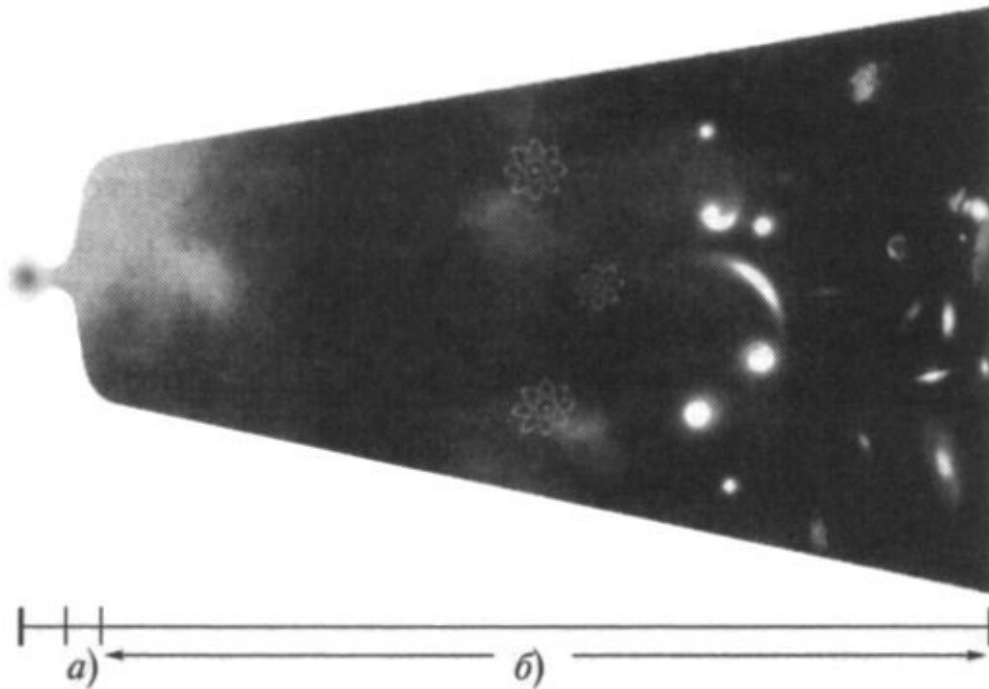


Рис. 10.3. (а) Инфляционная космология вводит быстрое гигантское раздувание пространства в ранней истории Вселенной. (б) После раздувания эволюция Вселенной переходит в стандартную эволюцию, разработанную в модели Большого взрыва

Открытие Гута — названное *инфляционной космологией* — вместе с важными усовершенствованиями, внесёнными Линде, Альбрехтом и Стейнхардтом, объяснило, что именно с самого начала заставило пространство расширяться. Поле Хиггса, удерживаемое на величине, соответствующей энергии поля выше нуля, может обеспечить взрыв,

заставивший пространство раздуваться. Гут снабдил Большой взрыв собственно взрывом.

Рамки инфляции

Открытие Гута было быстро оценено как крупное достижение и определило доминирующее направление космологических исследований. Но отметим два момента. Во-первых, в стандартной модели Большого взрыва сам взрыв произошёл как бы в момент времени «нуль», в самом начале Вселенной, так что он выглядит как акт творения. Но точно так же, как кусок динамита взрывается только когда его правильно подожгли, в инфляционной космологии взрыв произошёл только тогда, когда сложились подходящие условия, — когда имелось поле инфлатона, величина которого обеспечила энергию и отрицательное давление, инициировавшие взрыв отталкивающей гравитации, — и это вовсе не обязано совпадать с «творением» Вселенной. По этой причине инфляционный взрыв лучше всего представлять как *одно из* событий, которое пережила существовавшая и до него Вселенная, но не обязательно как *именно то* событие, которое создало Вселенную. Мы отметили это на рис. 10.3, сохранив некоторое размытое пятно от рис. 9.2, обозначив наше неведение относительно фундаментального начала. Более точно, если инфляционная космология верна, то пятно означает наше неведение относительно того, почему имелось поле инфлатона, почему чаша его потенциальной энергии имела форму, подходящую для того, чтобы произошла инфляция, почему имелись пространство и время, в рамках которых могло иметь место всё вышесказанное, и, как сказано в ещё более грандиозной фразе Лейбница, почему есть нечто, вместо ничто.

Второе наблюдение состоит в том, что инфляционная космология не является отдельной теорией. Скорее это некий космологический каркас, выстроенный вокруг понимания, что гравитация может быть отталкивающей и, следовательно, может привести к раздуванию пространства. Точные детали раздувания — когда оно произошло, как долго оно длилось, какова была отталкивающая сила, во сколько раз Вселенная увеличилась во время раздувания, каково количество энергии, которое инфляция вложила в обычную материю, когда раздувание подошло к концу и т. д. — зависят от деталей, которые в настоящее время находятся за пределами наших способностей определить их только из теории; больше всего они зависят от таких деталей, как размер и форма чаши

потенциальной энергии поля инфлатона. Поэтому многие годы физики изучали разные возможности — различные формы потенциальной энергии, различное количество полей инфлатона, работающих в тандеме, и т. д. — и определяли, какие параметры дают лучшее соответствие теорий с астрономическими наблюдениями. Важно то, что имеются разделы инфляционных космологических теорий, которые не зависят от деталей и поэтому являются общими, по существу, для любой реализации. Само раздувание, по определению, является одним из таких свойств, и потому любая инфляционная модель приходит к взрыву. Но имеются и другие свойства, присущие всем инфляционным моделям, которые жизненно важны, поскольку решают проблемы, заведшие в тупик стандартную космологию Большого взрыва.

Инфляция и проблема горизонта

Одна из таких проблем называется проблемой горизонта и заключается в однородности микроволнового фонового излучения, о котором мы говорили ранее. Напомним, что температура микроволнового излучения, приходящего к нам с любого выбранного направления в пространстве, согласуется с температурой излучения, приходящего с любого другого направления, с чрезвычайной точностью (до тысячной доли градуса). Этот наблюдательный факт является ключевым, поскольку он подтверждает однородность всего пространства, допуская гигантские упрощения в теоретических моделях космоса. В предыдущих главах мы использовали эту однородность, чтобы существенно снизить количество возможных форм пространства и чтобы обосновать существование однородного космического времени. Проблема возникает, когда мы пытаемся объяснить, *почему* Вселенная стала такой однородной. Как получилось, что страшно удалённые области Вселенной так подстроились друг к другу, что стали иметь почти одинаковую температуру?

Если вы вспомните главу 4, то одна из возможностей заключается в том, что точно так же, как нелокальное квантовое запутывание может коррелировать спины двух далеко разнесённых частиц, оно может коррелировать также и температуры двух далеко разнесённых областей пространства. Хотя это интересное предположение, но, как обсуждалось в конце главы 4, колоссальное размывание запутывания во всех ситуациях, кроме наиболее контролируемых, совершенно исключает такую возможность. Но, может быть, имеется более простое объяснение. Может

быть, давным-давно, когда все области пространства были ближе друг к другу, их температуры выравнивались благодаря их тесному контакту, примерно так, как нагретая кухня и холодная жилая комната сравниваются температурой, когда дверь между ними на время открыта. Однако в стандартной теории Большого взрыва это объяснение также не проходит. Приведём другую возможность, о которой стоит подумать.

Представьте, что вы просматриваете фильм, который показывает всю космическую эволюцию от начала до сегодняшнего дня. Остановите плёнку на некотором произвольном моменте и спросите себя: могут ли две различные области пространства, вроде кухни и жилой комнаты, влиять на температуру друг друга? Могут ли они обмениваться светом и теплом? Ответ зависит от двух вещей: от расстояния между областями и от времени, прошедшего с момента взрыва. Если расстояние между ними меньше, чем путь, который может проделать свет за время с момента Взрыва, то области могут повлиять друг на друга; в противном случае не могут. Тогда вы можете подумать, что все области наблюдаемой Вселенной могли провзаимодействовать друг с другом где-то вблизи начала Вселенной, поскольку чем дальше мы отматываем плёнку назад, тем ближе становятся области и поэтому им легче взаимодействовать. Но это рассуждение слишком поспешно; оно не учитывает тот факт, что не только области пространства были ближе друг к другу, но у них также было меньше времени, чтобы осуществить связь.

Чтобы провести правильный анализ, представьте фильм о космической эволюции, прокручивающийся в обратном направлении, при этом сосредоточьтесь на двух областях пространства, находящихся в настоящее время на противоположных сторонах наблюдаемой Вселенной, — на областях настолько удалённых, что они в настоящее время находятся вне сферы влияния друг на друга. Если для уменьшения расстояния между ними вдвое мы отматываем космическую плёнку более чем наполовину назад, тогда, хотя области пространства и стали ближе друг к другу, взаимодействие между ними всё равно невозможно: они оказались разделены расстоянием, вдвое меньшим чем сегодня, но и времени с момента Взрыва прошло *меньше*, чем половина от сегодняшнего, так что свет смог бы пролететь только *меньше* половины нужного расстояния. Аналогично, если из этой точки на плёнке мы снова переместимся более чем наполовину назад к началу, чтобы ещё раз вдвое уменьшить расстояние между областями, сообщение между ними снова станет ещё более сложным. При таком характере космической эволюции, хотя области и были ближе друг к другу в прошлом, становится всё более загадочным, как

они сумели выровнять температуры. По отношению к тому, как далеко может пройти свет, эти области становятся всё более недоступными друг для друга, по мере того как мы рассматриваем их все во всё более ранние моменты времени.

Это в точности то, что происходит в стандартной теории Большого взрыва. В ней гравитация действует только как притягивающая сила, так что с самого начала она замедляет расширение пространства. Если что-либо замедляется, ему требуется больше времени, чтобы покрыть заданное расстояние. Например, представьте, что скакун Секретариат^[64] стартовал стремительной иноходью и покрыл первую половину скаковой дистанции за две минуты, но, поскольку сегодня не его лучший день, он заметно сдал на второй половине и затратил на неё три минуты, чтобы добраться до финиша. При просмотре плёнки скачек в обратном направлении нам придётся отмотать плёнку более чем на половину её длины назад, чтобы увидеть, как Секретариат пересекает отметку половины дистанции (нам придётся передвинуться по всей пятиминутной плёнке назад к двухминутной отметке). Аналогично, поскольку в стандартной теории Большого взрыва гравитация замедляет расширение пространства, то из любой точки на космической плёнке нам придётся отмотать больше чем половину времени назад, чтобы уменьшить наполовину расстояние между двумя областями. И, как говорилось выше, это означает, что хотя области пространства и были ближе друг к другу в более ранние времена, но для них было более трудно — а не менее — оказать друг на друга влияние, и потому ещё более непонятно — а не менее, — что они как-то смогли уравнять температуру.

Физики определяют *космический горизонт* области (или, для краткости, *горизонт*) как наиболее удалённые от области точки пространства, которые достаточно близки к данной области в том смысле, что они могут обмениваться с областью световыми сигналами за время, прошедшее с момента взрыва. Имеется аналогия с самыми удалёнными предметами, которые мы можем видеть на земной поверхности из некоторой определённой точки наблюдения.^{138} Тогда *проблема горизонта* заключается в том загадочном факте, что, как следует из наблюдений, области, горизонты которых всегда были разделены, — области, которые никогда не могли взаимодействовать, связываться друг с другом или любым способом оказывать друг на друга влияние, — каким-то образом имеют почти одинаковую температуру.

Проблема горизонта не означает, что стандартная модель Большого

взрыва неверна, но она настоятельно требует объяснения. Инфляционная космология его даёт.

В инфляционной космологии имелось краткое мгновение, во время которого гравитация была отталкивающей, и это заставляло пространство расширяться всё быстрее и быстрее. Во время этой части фильма вам пришлось бы отмотать плёнку менее чем наполовину длины назад, чтобы вдвое уменьшить расстояние между областями. Представьте себе такой забег, в котором Секретариат покрыл первую половину дистанции за две минуты, а затем, поскольку это был главный забег его жизни, ускорился и промчался вторую половину всего за одну минуту. Вам придётся перемотать трёхминутную плёнку только к двухминутной отметке — менее чем наполовину назад, — чтобы увидеть его пересекающим отметку половины дистанции. Аналогично, ускоряющийся темп разделения любых двух областей пространства во время инфляционного расширения означает, что для уменьшения расстояния между ними вдвое потребуется отмотать космическую плёнку меньше — *намного меньше*, — чем на половину времени назад к началу. Следовательно, по мере того как мы двигаемся всё дальше назад во времени, для любых двух областей пространства становится всё легче оказать влияние друг на друга, поскольку имеется всё больше времени для их взаимодействия. Расчёты показывают, что если фаза инфляционного расширения заставила пространство расшириться как минимум в 10^{30} раз (а это то число, которое легко получается в частных реализациях инфляционного сценария), все области пространства, которые мы видим в настоящее время, — все области пространства, температуры которых мы можем измерить, — могли взаимодействовать так же легко, как кухня и смежная жилая комната, и поэтому легко достигли одинаковой температуры в самые ранние моменты истории Вселенной.^[139] Иными словами, в самом начале пространство расширялось достаточно медленно, чтобы на большом пространстве установилась однородная температура, а затем в ходе интенсивного взрыва и всё более быстрого расширения Вселенная, начав с вялого старта, далеко разнесла близкие области с одинаковой температурой.

Вот как инфляционная космология объясняет столь загадочную однородность микроволнового фонового излучения, заполняющего пространство.

Инфляция и проблема плоскостности

Вторая проблема, решаемая инфляционной космологией, относится к форме пространства. В главе 8 мы выдвинули критерий симметрии, заключающийся в однородности пространства, и нашли три способа, как может быть изогнута ткань пространства. Обращаясь к нашей двумерной аналогии, можно выделить возможности положительной кривизны (форма, подобная поверхности шара), отрицательной кривизны (седловидная форма) и нулевой кривизны (форма, подобная бесконечной плоской поверхности стола или экрану видеоигры конечных размеров). На заре общей теории относительности физики поняли, что полное количество материи и энергии в каждом объёме пространства — плотность материи/энергии — определяет кривизну пространства. Если плотность материи/энергии высока, пространство свернётся в форму сферы; это значит, что будет положительная кривизна. Если плотность материи/энергии низка, пространство будет выворачиваться наподобие седла; это значит, будет отрицательная кривизна. А если, как отмечалось в предыдущей главе, плотность материи/энергии равняется очень специальной величине — критической плотности, примерно равной массе пяти атомов водорода (около 10^{-23} г) в каждом кубическом метре, — пространство будет лежать точно между этими двумя крайними случаями и будет совершенно плоским; т. е. кривизны не будет.

Теперь давайте разберёмся, в чём кроется загадка пространства.

Уравнения общей теории относительности, которые лежат в основе стандартной модели Большого взрыва, показывают, что если плотность материи/энергии в начале была в точности равна критической плотности, то она останется равной критической плотности при расширении пространства.^{[1140](#)} Но если плотность материи/энергии была хотя бы чуть-чуть больше или чуть-чуть меньше, чем критическая плотность, последующее расширение уведёт её от критической плотности очень и очень далеко. Просто чтобы почувствовать числа, отметим, что если через секунду после Большого взрыва Вселенная чуть-чуть не дотягивала до критической плотности, составляя 99,99% от неё, то, как показывают расчёты, сегодня её плотность упала бы до величины 0,00000000001 от критической плотности. Эта ситуация напоминает скалолаза, который идёт по тонкому как бритва гребню с крутым обрывом с каждой стороны. Если его шаги направлены строго вдоль гребня, он сможет его пройти. Но малейшая ошибка, шаг, сделанный чуть левее или правее, приведёт к существенно иному исходу. (Рискуя перегрузить читателя аналогиями, вспоминаю в этой связи душевую в студенческом общежитии колледжа

много лет назад: если удавалось установить кран абсолютно точно, можно было получить комфортную температуру воды. Но отклонение на йоту туда или сюда приводило либо к кипятку, либо к ледяной воде. Некоторые студенты просто совсем переставали принимать душ.)

Десятилетиями физики пытались измерить плотность материи/энергии во Вселенной. В 1980-е гг., хотя измерения были далеки от завершения, одно стало ясно: плотность материи/энергии Вселенной не превосходит критическую в тысячи и тысячи раз и не меньше её в тысячи и тысячи раз; соответственно, пространство не является сильно искривлённым, ни положительно, ни отрицательно. Это понимание представило стандартную модель Большого взрыва в неудобном свете. Отсюда следовало, что, для того чтобы стандартная модель Большого взрыва соответствовала наблюдениям, некоторый механизм — который, однако, никто не может объяснить или указать — должен был подстроить плотность материи/энергии ранней Вселенной *экстраординарно* точно к критической плотности. Например, расчёты показывают, что через одну секунду после Большого взрыва плотность материи/энергии Вселенной должна была находиться в пределах *миллионной от миллионной доли процента* от критической плотности; если бы плотность материи/энергии отклонилась от критической величины на любое значение, большее этого мизерного ограничения, то стандартная модель Большого взрыва предсказала бы на сегодня такую плотность материи/энергии, которая чрезвычайно отличалась бы от того, что мы наблюдаем. Поэтому в соответствии со стандартной моделью Большого взрыва ранняя Вселенная была сильно похожа на скалолаза, покачивающегося на чрезвычайно узком гребне. Ничтожное отклонение в условиях, существовавших во Вселенной миллиарды лет назад, должно было бы привести к сегодняшней Вселенной, сильно отличающейся от того, что показывают измерения астрономов. Это известно как *проблема плоскостности*.

Хотя мы схватили основную идею, важно понять, в каком смысле проблема плоскостности является проблемой. Проблема плоскостности ни коим образом не показывает, что стандартная модель Большого взрыва неверна. Убеждённый сторонник реагирует на проблему плоскостности пожатием плеч и лаконичной репликой: «Просто тогда так было», принимая тонко настроенное значение плотности материи/энергии ранней Вселенной — которое требует стандартная модель Большого взрыва, чтобы предсказания согласовывались с наблюдениями, — как необъяснимую данность. Но этот ответ вызывает отторжение у большинства физиков. Физики чувствуют, что теория очень неестественна, если её успехи зависят

от чрезвычайно точной подстройки свойств, для которой не видно фундаментального объяснения. Без объяснения причин, почему плотность материи/энергии ранней Вселенной должна была бы быть так тонко настроена на требуемую величину, многие физики находят стандартную модель Большого взрыва слишком надуманной. Таким образом, проблема плоскостности высвечивает экстремальную чувствительность стандартной модели Большого взрыва к условиям в удалённом прошлом, о которых мы знаем очень мало; это показывает, что теория должна предполагать, какой точно была Вселенная, для того чтобы быть работоспособной.

Напротив, физикам нравятся теории, предсказания которых нечувствительны к значениям неизвестных величин, вроде того, как обстояли дела в далёком прошлом. Такие теории кажутся надёжными и естественными, поскольку их предсказания не зависят от деталей, которые трудно или даже вообще невозможно определить напрямую. Именно такой теорией является инфляционная космология, и предлагаемое ею решение проблемы плоскостности иллюстрирует, почему это так.

Важное наблюдение заключается в том, что, в то время как притягивающая гравитация усугубляет любое отклонение от критической плотности материи/энергии, отталкивающая гравитация инфляционной теории делает наоборот: она *уменьшает* любое отклонение от критической плотности. Чтобы почувствовать, почему это так, самое простое — использовать тесную связь между плотностью материи/энергии Вселенной и её кривизной для обоснования этого геометрически. В частности, заметим, что хотя форма ранней Вселенной и была существенно искривлённой, после инфляционного расширения та часть пространства, которая достаточно велика, чтобы включить в себя наблюдаемую сегодня Вселенную, выглядит очень близко к плоской. Это свойство геометрии, о котором мы все хорошо осведомлены: поверхность баскетбольного мяча, очевидно, кривая, но потребовались и время, и смелые мыслители, прежде чем все согласились, что поверхность Земли также искривлена. Причина состоит в том, что при прочих равных условиях чем большие размеры у чего-то, тем более плавно оно изгибается, и тем более плоским кажется кусок заданного размера на его поверхности. Если вы накинете штат Небраска на сферу только в несколько сотен миль в диаметре, как на рис. 10.4а, он будет выглядеть искривлённым, но на земной поверхности, с чем согласны все жители Небраски, он выглядит плоским. Если вы расположите штат Небраска на сфере в миллиард раз больше Земли, он будет выглядеть ещё более плоским. В инфляционной космологии пространство растягивается настолько, что наблюдаемая Вселенная, тот

кусок, который мы можем видеть, является всего лишь малым лоскутком в гигантском космосе. Подобно штату Небраска, расположенному на гигантской сфере, как на рис. 10.4г, хотя вся Вселенная искривлена, *наблюдаемая* Вселенная будет очень близка к плоской.^{[\[141\]](#)}

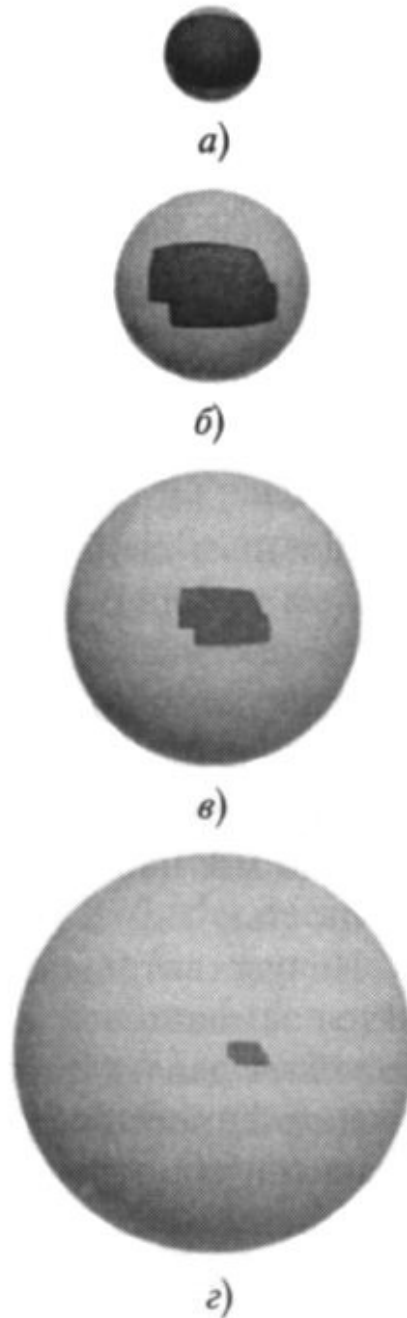


Рис. 10.4. Лоскут фиксированного размера, такой, как штат Небраска, кажется всё более и более плоским, когда он располагается на всё бóльших сферах. В этой аналогии сфера

представляет всю Вселенную, тогда как штат Небраска представляет наблюдаемую Вселенную — ту часть Вселенной, которая находится внутри нашего космического горизонта

Это похоже на то, как если бы в ботинки скалолаза и в узкий гребень, по которому он идёт, были вставлены сильные, противоположно ориентированные магниты. Даже если его шаг попадает немного мимо нужного места, сильное притяжение между магнитами удерживает его ногу на гребне. Аналогично, даже если ранняя Вселенная заметно отклонялась от критической плотности материи/энергии и потому была далека от плоской, инфляционное расширение обеспечит, что та часть пространства, к которой мы имеем доступ, будет *приведена* к плоской форме, а плотность материи/энергии, к которой мы имеем доступ, будет *приведена* к критической величине.

Прогресс и предсказания

Решение инфляционной космологией проблемы горизонта и плоскостности представляет собой огромный прогресс. Для того чтобы космологическая эволюция привела к однородной Вселенной, плотность материи/энергии которой хотя бы отдалённо приближалась к тому, что мы сегодня наблюдаем, стандартная модель Большого взрыва требует точнейшей, необъяснимой, почти сверхъестественной настройки первоначальных условий. Такую настройку можно предположить, как считают ярые защитники стандартной модели Большого взрыва, но отсутствие её объяснения делает теорию неестественной. Напротив, безотносительно к детальным свойствам плотности материи/энергии ранней Вселенной, инфляционная космологическая эволюция *предсказывает*, что часть Вселенной, которую мы можем видеть, должна быть очень близка к плоской; т. е. она *предсказывает*, что плотность материи/энергии, которую мы наблюдаем, должна практически совпадать с критической плотностью.^[65]

Нечувствительность к детальным свойствам ранней Вселенной является замечательным качеством инфляционной теории, поскольку она позволяет давать определённые предсказания независимо от нашей неосведомлённости об условиях далёкого прошлого. Но теперь мы должны спросить: как эти предсказания соотносятся с детальными и точными наблюдениями? Подтверждают ли данные наблюдений предсказание

инфляционной космологии, что мы должны наблюдать плоскую Вселенную, имеющую критическую плотность материи/энергии?

Долгие годы ответ был: «Не совсем». В многочисленных астрономических исследованиях тщательно измерялось количество материи/энергии, которое можно увидеть в космосе, и ответ получался на уровне 5% от критической плотности. Это далеко от гигантских или ничтожных плотностей, к которым естественно приводит стандартная модель Большого взрыва без искусственной тонкой настройки, и именно это я имел в виду, когда говорил раньше, что наблюдения дают плотность материи/энергии Вселенной, не отличающуюся в тысячи и тысячи раз от критической плотности в большую или меньшую сторону. Но даже и в этом случае, 5% — это меньше, чем 100%, предсказанные инфляцией. Но физики давно поняли, что в оценке таких данных необходимо проявлять осторожность. Астрономические обзоры, называя 5%, принимают во внимание только материю/энергию, которая излучает свет, и потому может быть видима в телескопы. Но уже десятилетия, даже до открытия инфляционной космологии, существовали веские указания, что Вселенная имеет массивную тёмную часть.

Предсказание темноты

В начале 1930-х гг. Фриц Цвикки, профессор астрономии Калифорнийского технологического института (в высшей степени жёлчный учёный и столь большой поклонник принципов симметрии, что своих коллег он называл сферическими идиотами, ибо согласно его объяснениям они были идиотами, с какой стороны на них не посмотреть)^{142}, обнаружил, что галактики в скоплении Волосы Вероники, содержащем тысячи галактик и находящемся на расстоянии около 370 млн световых лет от Земли, двигаются слишком быстро, чтобы видимая материя могла обеспечить достаточную гравитационную силу, удерживающую их в группе. Его анализ показал, что многие из наиболее быстро движущихся галактик должны были быть выброшены из группы, подобно каплям воды, отбрасываемым вращающимся велосипедным колесом. Однако этого не происходит. Цвикки предположил, что может существовать дополнительная материя, пропитывающая это скопление, которая не излучает света, но добавляет дополнительное гравитационное притяжение, необходимое, чтобы удерживать скопление вместе. Его расчёты показали, что если объяснение правильное, большая часть массы скопления должна

содержаться в этом несветящемся материале. К 1936 г. подтверждение было найдено Синклером Смитом из обсерватории Маунт Вилсон, который изучал скопление галактик в созвездии Девы и пришёл к аналогичному заключению. Но поскольку в наблюдениях обоих учёных, так же как и многих других последующих, имелось много различных неопределённостей, многих не удалось убедить, что имеется массивная невидимая материя, гравитационное притяжение которой удерживает вместе галактики в группах.

На протяжении следующих тридцати лет наблюдательные подтверждения несветящейся материи продолжали поступать,^[143] но окончательно вопрос был решён работой астронома Веры Рубин из Института Карнеги в Вашингтоне вместе с Кентом Фордом и другими. Рубин и её коллеги изучили движение звёзд внутри большого числа вращающихся галактик и пришли к заключению, что там есть только то, что мы видим, то многие звёзды галактик должны быть попросту выброшены наружу. Их наблюдения окончательно показали, что видимая материя галактик нигде не может вызывать достаточно сильное гравитационное притяжение, чтобы удержать наиболее быстрые звёзды. Детальный анализ, проведённый ими, показал также, что звёзды будут оставаться гравитационно связанными, если галактики, где они обитают, погружены в гигантский шар несветящейся материи (как показано на рис. 10.5), общая масса которой намного превосходит массу светящейся галактической материи. Итак, как на представлении, где можно догадаться о присутствии одетого в тёмное мима, хотя видны только его руки в белых перчатках, летающие туда и сюда по неосвещённой сцене, астрономы пришли к выводу, что Вселенная должна быть заполнена *тёмной материей* — материей, которая не собирается в звёзды и поэтому не излучает свет и которая при этом оказывает гравитационное притяжение, не проявляя себя визуально. Светящиеся составляющие Вселенной — звёзды — выглядят плавающими маяками в гигантском океане тёмной материи.

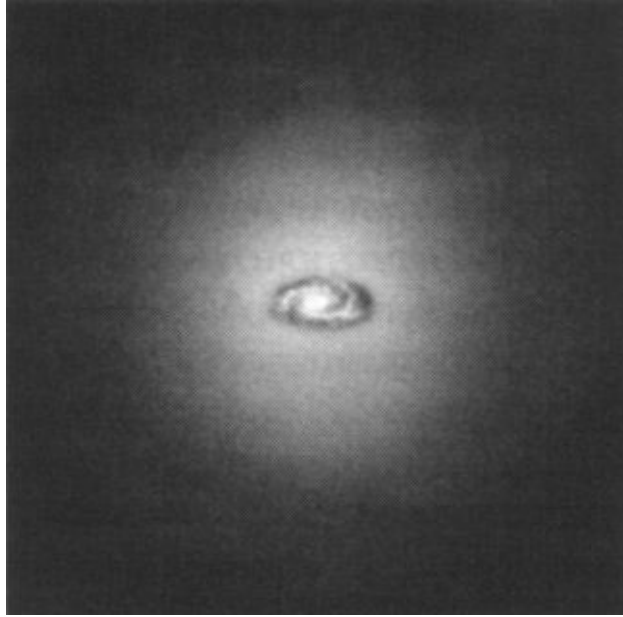


Рис. 10.5. Галактика, погруженная в шарообразное облако тёмной материи (которое искусственно подсвечено, чтобы сделать его видимым на рисунке)

Но если тёмная материя обязана существовать, чтобы привести к наблюдаемому движению звёзд и галактик, из чего она состоит? До настоящего времени никто не знает. Природа тёмной материи остаётся большой тайной, хотя астрономы и физики предложили множество возможных кандидатов на её роль, начиная с различных экзотических частиц и кончая космическим бассейном миниатюрных чёрных дыр. Но даже без определения её состава благодаря тщательному анализу её гравитационного влияния астрономы смогли с хорошей точностью определить, сколько тёмной материи распределено по Вселенной. В результате они получили примерно 25% от критической плотности.^{[\[144\]](#)} Таким образом, вместе с 5%, приходящимися на видимую материю, тёмная материя даёт нам 30% от количества, предсказанного инфляционной космологией.

Итак, это, конечно, прогресс, но в течение долгого времени учёные чесали затылки, удивляясь, куда делись оставшиеся 70% Вселенной, которые, если инфляционная космология верна, определённо находятся в самоволке. И вот в 1998 г. две группы астрономов пришли к одному и тому же удивительному заключению, которое замкнуло круг нашей истории и снова явило мощь предвидения Альберта Эйнштейна.

Убегающая Вселенная

Аналогично тому, как вам хочется получить заключение другого специалиста для подтверждения медицинского диагноза, физики тоже стремятся услышать иное мнение, когда они сталкиваются с экспериментальными данными или теориями, которые указывают на наличие загадки. Из таких мнений наиболее убедительными являются те, которые приводят к тем же результатам путём, существенно отличным от исходного. Когда различные объяснения с разных направлений приводят к одному результату, это даёт хороший шанс, что мы попали в научное яблочко.

Поэтому понятно, что физики стремились к независимому подтверждению следующего вывода инфляционной космологии: 70% материи/энергии Вселенной ещё предстоит обнаружить и измерить. Давно было осознано, что таким трюком могли бы стать измерения *параметра замедления*.

Сразу после начального инфляционного взрыва обычная притягивающая гравитация стала замедлять расширение пространства. Темп, с которым происходит это замедление, называется параметром замедления. Точное измерение этого параметра могло бы обеспечить независимую оценку полного количества материи во Вселенной: большее количество материи, независимо от того, даёт она свет или нет, означает большее гравитационное притяжение и потому сильнее замедляет пространственное расширение.

Многие десятилетия астрономы пытались измерить торможение Вселенной, но, хотя это и просто с принципиальной стороны, на практике это является сложной задачей. Когда мы наблюдаем удалённые небесные тела, вроде галактик или квазаров, мы видим их такими, какими они были в далёком прошлом: чем они дальше от нас, тем дальше назад во времени мы смотрим. Поэтому, если мы могли бы измерить, как быстро они от нас удаляются, мы узнали бы, как быстро Вселенная расширялась в удалённом прошлом. Более того, если бы мы могли провести такие измерения для астрономических объектов, расположенных на разных расстояниях, мы смогли бы измерить скорость расширения Вселенной в разные моменты прошлого. Сравнивая эти скорости расширения, можно было бы определить, как замедляется расширение пространства со временем, и отсюда определить параметр замедления.

Для реализации этой стратегии по измерению параметра замедления

требуются две вещи: способ измерения расстояния до данного астрономического объекта (так чтобы мы знали, как далеко назад во времени мы заглядываем) и способ определения скорости, с которой объект удаляется от нас (так чтобы мы знали темп расширения пространства в этот момент прошлого). Последнюю составляющую получить проще. Точно так же, как вой сирены полицейского автомобиля переходит к более низкому тону, когда он удаляется от вас, частота колебаний света, испущенного астрономическим источником, также падает, когда объект удаляется. А поскольку свет испускается атомами вроде водорода, гелия или кислорода — атомами, входящими в состав звёзд, квазаров и галактик, — которые тщательно изучены в лабораторных условиях, точное определение скорости объекта может быть проведено путём изучения того, насколько сильно свет, который мы получаем от астрономического источника, отличается от света, который мы видим в лаборатории.

Но первая составляющая — метод точного определения, как далеко находится объект, оказалась головной болью астрономов. Можно ожидать, что чем дальше что-либо находится, тем более тусклым будет выглядеть, но обратить это простое наблюдение в количественное измерение трудно. Чтобы судить о расстоянии до объекта по его видимой яркости, вам нужно знать его абсолютную светимость — насколько ярким он был бы, если бы располагался прямо рядом с вами. Но определить абсолютную светимость объекта, удалённого на миллиарды световых лет, трудно. Генеральная стратегия заключается в поиске таких разновидностей небесных тел, которые по фундаментальным астрофизическим причинам всегда имеют стандартную светимость. Если пространство заполнено зажжёнными 100-ваттными лампочками, хитрость бы удалась, поскольку мы могли бы легко определить расстояние до данной лампочки на основании того, насколько она выглядит тусклой (хотя это сложная задача — увидеть 100-ваттную лампочку на большом расстоянии). Но, поскольку пространство не имеет такого оборудования, что могло бы сыграть роль лампочки стандартной яркости или, на языке астрономии, что может сыграть роль *стандартной свечи*? Астрономы долго изучали различные возможности, но наиболее успешным кандидатом на сегодняшний день является особый класс взрывов сверхновых звёзд.

Когда звёзды исчерпывают своё ядерное горючее, направленное наружу давление, создаваемое реакциями ядерного синтеза в ядре звезды, уменьшается и звезда начинает схлопываться под тяжестью своего собственного веса. Когда ядро звезды рушится в себя, его температура быстро возрастает, иногда приводя к гигантскому взрыву, который сдувает

внешние слои звезды, вызывая сверкающее зрелище небесного фейерверка. Такой взрыв известен как рождение сверхновой; в течение нескольких недель одна взорвавшаяся звезда может сиять так же ярко, как миллиард солнц. Это действительно поражает воображение: отдельная звезда сияет почти так же ярко, как целая галактика! Различные типы звёзд — различных размеров, с разным относительным содержанием различных атомов и т. д. — приводят к различным типам взрывов сверхновых, но много лет назад астрономы поняли, что определённые взрывы сверхновых всегда светят с одинаковой абсолютной яркостью. Это взрывы сверхновых типа Ia.

В типе сверхновых Ia белый карлик — звезда, которая исчерпала запас ядерного топлива, но имеет недостаточную массу, чтобы самой по себе стать сверхновой, — всасывает вещество с поверхности находящейся рядом звезды-компаньона. Когда масса белого карлика достигает критической величины, составляющей около 1,4 массы Солнца, в нём лавинообразно развивается ядерная реакция, которая заставляет его стать сверхновой звездой. Поскольку такие взрывы сверхновых происходят, когда карликовая звезда достигает одной и той же критической массы, характеристики взрыва, включая его абсолютную светимость, практически одинаковы от случая к случаю. Более того, поскольку сверхновые, в отличие от 100-ваттных лампочек, чрезвычайно мощны, они не только имеют стандартную надёжную светимость, но их также можно ясно видеть через Вселенную. Так что они являются первыми кандидатами на роль стандартной свечи. [\[145\]](#)

В 1990-е гг. две группы астрономов, одна под руководством Сола Перлмуттера в Лоуренсовской национальной лаборатории в Беркли и другая под руководством Брайана Шмидта в Австралийском национальном университете, взялись за определение параметра замедления — и, следовательно, полной материи/энергии — Вселенной путём измерения скоростей удаления сверхновых типа Ia. Определение того, что сверхновая принадлежит к типу Ia, довольно просто, поскольку излучение, генерируемое при её взрыве, имеет весьма характерный рисунок: сначала крутой рост, а затем пологое падение интенсивности. Но на самом деле поймать сверхновую типа Ia на месте преступления является немалым подвигом, поскольку такие взрывы в типичной галактике происходят только раз в несколько сотен лет. Тем не менее благодаря инновационной технологии одновременного наблюдения тысяч галактик через телескопы с широким полем обзора команды смогли обнаружить около четырёх дюжин сверхновых типа Ia на различных расстояниях от Земли. После

скрупулёзного определения расстояния и скорости удаления каждой сверхновой обе группы пришли к совершенно неожиданному заключению: начиная с времени, когда Вселенной было около 7 млрд лет, темп её расширения *не* тормозился. Наоборот, темп расширения *возрастал*.

Группы пришли к заключению, что первые 7 млрд лет после первичного взрыва расширение Вселенной замедлялось, примерно как тормозит автомобиль, когда приближается к контрольному посту ГАИ. Это и ожидалось. Но результаты измерений показали, что подобно водителю, который нажимает на педаль газа после прохождения контрольного поста, расширение Вселенной с тех пор ускоряется. Темп расширения пространства через 7 млрд лет после Взрыва был меньше, чем темп расширения через 8 млрд лет после Взрыва, который в свою очередь был меньше, чем темп расширения через 9 млрд лет после Взрыва, и т. д. — все они были меньше, чем темп расширения сегодня. Ожидаемое торможение расширения пространства переключилось на неожиданное ускорение.

Но как такое может быть? Ответ обеспечивает то самое второе независимое подтверждающее мнение относительно пропавших 70% материи/энергии, которые разыскивали физики.

Пропавшие 70%

Если вы мысленно перенесётесь в 1917 г., когда Эйнштейн ввёл космологическую постоянную, у вас будет достаточно информации, чтобы выдвинуть предположение о том, почему Вселенная ускоряется. Обычные материя и энергия вызывают обычную притягивающую гравитацию, которая замедляет расширение пространства. Но по мере того как Вселенная расширяется и разные объекты всё более отдаляются друг от друга, это космическое гравитационное притяжение, хотя и продолжает замедлять расширение, становится слабее. И это приводит нас к новому и неожиданному повороту. Если бы Вселенная имела космологическую постоянную — и если бы её значение имело точно нужную, маленькую величину, — то на протяжении примерно 7 млрд лет с Большого взрыва её гравитационное отталкивание перекрывалось бы гравитационным притяжением обычной материи, приводя к общему замедлению расширения, в соответствии с результатами наблюдений. Но затем, когда обычная материя рассеялась в пространстве и её гравитационное притяжение ослабло, отталкивающее воздействие космологической постоянной (величина которого не изменяется, по мере того как материя

рассеивается) должно было постепенно взять верх, и эра замедленного расширения пространства должна была смениться эрой ускоренного расширения.

В конце 1990-х гг. такие рассуждения и углублённый анализ экспериментальных данных привели обе группы, Перлмуттера и Шмидта, к мысли, что Эйнштейн не ошибся восемьдесят лет назад, когда ввёл космологическую постоянную в уравнения гравитации. Вселенная, как предположили обе группы, *на самом деле* имеет космологическую постоянную.^[146] Она имеет не ту величину, которую предлагал Эйнштейн, поскольку он искал возможность существования статической Вселенной, где гравитационное притяжение и отталкивание точно уравновешивались бы, но эти исследователи обнаружили, что уже миллиарды лет отталкивание доминирует. Но несмотря на эти детали и на то, что открытие групп Перлмуттера и Шмидта должно тщательно изучаться и должны быть доведены до конца необходимые исследования, нельзя не удивляться предвидению Эйнштейна, которое подтверждается спустя 80 лет.

Скорость убегания сверхновых зависит от разницы между гравитационным притяжением обычной материи и гравитационным отталкиванием «тёмной энергии», которую даёт космологическая постоянная. Допуская, что количество материи, как видимой, так и тёмной, составляет около 30% от критической плотности, исследователи сверхновых пришли к заключению, что ускоренное расширение, которое они наблюдали, требует отталкивающего эффекта космологической постоянной, тёмная энергия которой составляет около 70% от критической плотности.

Это поразительное число. Если оно верно, тогда не только обычная материя — протоны, нейтроны, электроны — составляют жалкие 5% от материи/энергии Вселенной, и не только некоторая, на сегодня неидентифицированная тёмная материя составляет по меньшей мере *в пять раз* большее количество, но также *большую часть* материи/энергии во Вселенной составляет совершенно отличающаяся и ещё более таинственная тёмная энергия, которая распределена по всему пространству. Если эти идеи верны, они самым невероятным образом углубляют революционный переворот в мировоззрении человечества, произведённый Коперником: мы не только не являемся центром Вселенной, но даже материя, из которой мы состоим, подобна обломкам, плавающим в космическом океане. Если бы протоны, нейтроны и электроны не были включены в замысел великого творения, полная материя/энергия Вселенной почти не уменьшилась бы.

Но имеется вторая, равно важная причина, почему 70% является удивительным числом. Космологическая постоянная, которая даёт 70% в критической плотности, будет вместе с 30%, приходящимися на обычную материю и тёмную материю, давать полную материю/энергию Вселенной, точно равную всем 100%, предсказываемым инфляционной космологией! Так что отталкивание, продемонстрированное результатами изучения сверхновых, может быть объяснено в точности тем количеством тёмной энергии, которое необходимо для объяснения невидимых 70% Вселенной, о которых чесали затылки инфляционные космологи. Измерения сверхновых и инфляционная космология изумительно дополняют друг друга. Они друг друга подтверждают. Каждое даёт подтверждающее второе независимое мнение для другого. [{147}](#)

Объединяя наблюдательные результаты по сверхновым с теоретическими представлениями инфляции, мы, таким образом, получаем набросок космической эволюции, который представлен на рис. 10.6. Сначала энергия Вселенной была заключена в поле инфлатона, которое находилось вне своего состояния минимальной энергии. Вследствие своего отрицательного давления поле инфлатона вызвало гигантский взрыв инфляционного расширения. Затем, примерно через 10^{-35} с, когда поле инфлатона соскользнуло на дно своей чаши потенциальной энергии, взрыв расширения подошёл к концу и инфлатон высвободил свою энергию, отдав её на производство обычной материи и излучения. Много миллиардов лет эти привычные составляющие Вселенной создавали обычное притягивающее гравитационное действие, которое замедляло расширение пространства. Но когда Вселенная выросла и стала более разреженной, гравитационное притяжение уменьшилось. Около 7 млрд лет назад обычное гравитационное притяжение стало настолько слабым, что гравитационное отталкивание космологической постоянной стало доминировать, и с тех пор темп расширения пространства постоянно растёт.

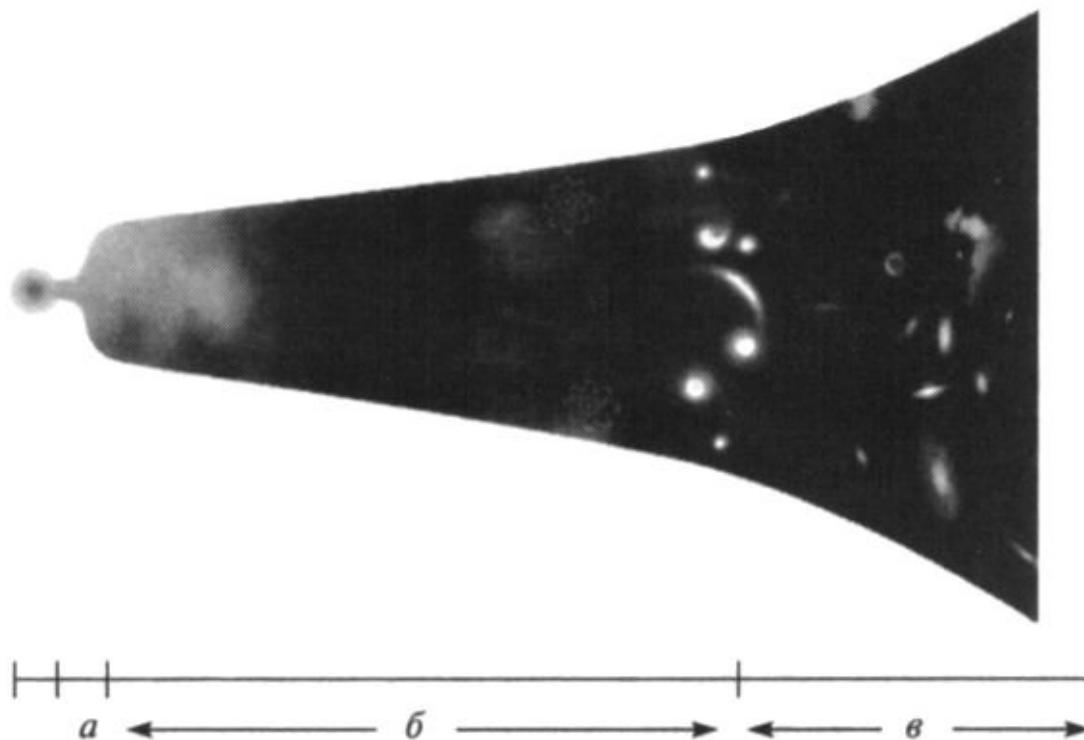


Рис. 10.6. Шкала времени космической эволюции: (а) Инфляционный взрыв. (б) Эволюция по стандартной модели Большого взрыва. (в) Эра ускоренного расширения

Примерно через 100 млрд лет от сегодняшнего дня все галактики, за исключением самых близких, будут раскиданы в разные стороны раздувающимся пространством со скоростями больше световой, так что мы не сможем их увидеть независимо от мощности используемых телескопов. Если эти идеи верны, то в далёком будущем Вселенная будет безбрежным, пустым и уединённым местом.

Загадки и прогресс

Кажется, что эти открытия разложили кусочки космического паззла по местам. Вопросы, оставленные без ответа стандартной теорией Большого взрыва, — Что заставило расширяться пространство? Почему температура микроволнового фонового излучения так однородна? Почему пространство кажется имеющим плоскую форму? — были решены инфляционной теорией. Несмотря на это, остаются нерешённые вопросы относительно фундаментальных первооснов. Была ли некоторая эра перед

инфляционным взрывом, и, если была, на что она была похожа? Откуда взялось поле инфлатона, смещённое относительно его конфигурации с наименьшей энергией, которое инициировало инфляционное расширение? И самый новый из всех вопросов: почему Вселенная составлена из такой мешанины ингредиентов — 5% представлены привычной материей, 25% — тёмной материей, 70% — тёмной энергией? Несмотря на безмерно радующий факт, что эта космическая рецептура согласуется с инфляционными предсказаниями, согласно которым плотность Вселенной должна составлять 100% от критической плотности, и хотя это одновременно объясняет ускоренное расширение, найденное при исследовании сверхновых, многим физикам этот винегрет кажется явно непривлекательным. Почему, спрашивают многие, состав Вселенной оказался таким сложным? Почему имеется целая горсть мало похожих друг на друга ингредиентов, смешанных в такой, кажущейся случайной, пропорции? Есть ли в основании этого какой-то осмысленный план, который теоретические исследования ещё должны обнаружить?

Никто пока не предложил убедительных ответов на эти вопросы; они находятся среди неотложных научных проблем, направляя текущие космологические исследования, и они призваны напоминать нам о многих запутанных узлах, которые мы ещё должны распутать, прежде чем мы сможем сказать, что имеем полное понимание рождения Вселенной. Но несмотря на всё ещё остающиеся существенные проблемы инфляция является исключительно продвинутой перспективной космологической теорией. Несомненно, доверие физиков к инфляции основывается на достижениях, которые мы до сих пор обсуждали. Но уверенность в инфляционной космологии имеет ещё более глубокие корни. Как мы увидим в следующей главе, целый ряд других аргументов — связанных как с наблюдениями, так и с теоретическими открытиями, — убедили многих физиков, которые работают в этой области, что идея инфляции является самым важным и самым прочным вкладом нашего поколения в космологическую науку.

Глава 11. Кванты на небе в алмазах

Инфляция, квантовая дрожь и стрела времени

Открытие механизма инфляции положило начало новой эре в космологических исследованиях, и за прошедшие десятилетия на эту тему были написаны многие тысячи статей. Учёные рассмотрели буквально каждый уголок и трещинку в теории, которую вы, вероятно, уже можете представить. В то время как многие из этих работ были сфокусированы на деталях технического характера, в других учёные шли дальше и показывали, как инфляция не только решает специфические космологические проблемы, недостижимые для стандартной модели Большого взрыва, но также обеспечивает мощные новые подходы к большому числу старых вопросов. Среди них выделяется три направления: вопросы, связанные с формированием компактных структур, таких как галактики; с количеством энергии, требующимся для рождения Вселенной, которую мы видим; и (что имеет первоочередную важность для нашего рассказа) с происхождением стрелы времени, — на которых инфляция привела к значительному и, как сказали бы многие, впечатляющему прогрессу.

Давайте посмотрим.

Квантовый скайрайтинг [\[66\]](#)

Решение проблем горизонта и плоскостности, предложенное инфляционной космологией, было её первым притязанием на славу, причём справедливым. Как мы видели, это было значительным успехом. Но за прошедшие с тех пор годы многие физики пришли к уверенности, что и другие достижения инфляционной теории разделяют высшую позицию в списке самых важных достижений теории.

Одно из важных достижений имеет отношение к проблеме, о которой я до сего момента не призывал вас задуматься: как получилось, что во Вселенной есть галактики, звёзды, планеты и другие массивные образования? Последние три главы я просил вас сосредоточиться на астрономически больших масштабах — масштабах, в которых Вселенная выглядит однородной, масштабах настолько больших, что целые галактики представляются как отдельные молекулы H_2O , в то время как сама

Вселенная подобна полному стакану воды. Но рано или поздно космологии приходится столкнуться с фактом, что когда вы изучаете космос на «более мелких» масштабах, вы обнаруживаете компактные структуры, такие как галактики. И здесь опять мы сталкиваемся с загадкой.

Если Вселенная на самом деле гладкая, однородная и одинаковая в больших масштабах — свойство, которое подтверждается наблюдениями и которое является сердцем всего космологического анализа, — то откуда взялись мелкомасштабные неоднородности? Непреклонный сторонник стандартной космологии Большого взрыва снова может уйти от вопроса, сославшись на в высшей степени благоприятные и непостижимо тонко настроенные условия в ранней Вселенной: «Возле самого начала, — как мог бы сказать этот сторонник, — всё было в общем и целом гладким и однородным, но не *совершенно* однородным. Почему условия сложились таким образом, я сказать не могу. Просто так тогда было. Со временем эти мелкие неоднородности росли, поскольку сгущение материи, будучи более плотным, чем его окружение, создаёт более значительное гравитационное притяжение и, следовательно, захватывает новый, находящийся по соседству материал, становясь ещё больше. В конечном счёте сгущения стали достаточно большими, чтобы сформировать звёзды и галактики». Это звучало бы убедительно, если бы не два недостатка: полное отсутствие объяснения как общей начальной однородности на больших масштабах, так и этих важных мелких неоднородностей. Вот где инфляционная космология обеспечивает прогресс, радующий глаз. Мы уже видели, что инфляция предлагает объяснение крупномасштабной однородности и, как мы сейчас узнаем, объяснительная сила теории распространяется ещё дальше. Замечательно, что в соответствии с инфляционной космологией начальные неоднородности, которые в конечном счёте привели к формированию звёзд и галактик, возникают из *квантовой механики*.

Эта впечатляющая идея возникает благодаря взаимодействию двух кажущихся несоизмеримыми областей физики: инфляционного расширения пространства и квантового принципа неопределённости. Принцип неопределённости говорит нам, что то, насколько точно в космосе могут быть определены различные взаимно дополнительные физические свойства, всегда определяется компромиссом. Наиболее знакомый пример (см. главу 4) связан с материей: чем точнее определено положение частицы, тем менее точно может быть определена её скорость. Но принцип неопределённости применим также и к полям. Следуя тем же рассуждениям, которые мы использовали применительно к частицам, принцип неопределённости означает, что чем точнее определена величина

поля в данной точке пространства, тем менее точно может быть определена скорость изменения поля в этом же месте. (Положение частицы и темп изменения её положения — её скорость — играют в квантовой механике роль, аналогичную величине поля и скорости изменения величины поля в данном месте в пространстве).

Я бы суммировал содержание принципа неопределённости, сказав, что квантовая механика делает всё дрожащим и турбулентным. Если скорость частицы не может быть известна с абсолютной точностью, мы также не сможем описать, где частица будет располагаться даже через долю секунды, так как скорость *сейчас* определяет положение *потом*. В известном смысле частица свободна иметь ту или иную скорость или, более точно, принять смесь многих скоростей, а потому она безумно скачет, бессистемно двигаясь туда-сюда. Для полей ситуация аналогичная. Если скорость изменения поля не может быть определена с абсолютной точностью, тогда мы также не сможем определить, какой будет величина поля в некотором месте даже мгновением позже. В некотором смысле поле колеблется вверх-вниз с той или иной скоростью или, более точно, оно имеет странную смесь многих различных скоростей изменения, а потому его величина будет подвергаться неистовому, нечёткому, хаотичному дрожанию.

В повседневной жизни мы непосредственно не воспринимаем эти скачки, как в случае частиц, так и в случае полей, поскольку они происходят на субатомных масштабах. Но именно тут оказывается важна инфляция. Внезапный взрыв инфляционного расширения растягивает пространство в такой гигантской степени, что изначально бывшее микроскопическим вырастает до макроскопических масштабов. В качестве ключевого примера пионеры^{148} инфляционной космологии обнаружили, что хаотические различия между квантовыми отклонениями полей в разных местах пространства могли бы сгенерировать небольшие неоднородности на микроскопических масштабах; вследствие беспорядочных квантовых возмущений количество энергии в одном месте могло бы чуть-чуть отличаться от количества в другом. Тогда, благодаря последующему инфляционному расширению пространства, эти ничтожные вариации могли бы быть растянуты до масштабов, намного больших, чем квантовая область, что создало бы небольшие неоднородности на макроскопических масштабах, примерно как мелкие закорючки, нарисованные на сдутом воздушном шаре фломастером, растянутся до хорошо видимых размеров, когда вы надуете шар. В этом, думают физики, и заключается происхождение неоднородностей, которые непоколебимые

последователи стандартной модели Большого взрыва просто декларируют без объяснений: «так тогда было». Благодаря гигантскому растягиванию неустранимых квантовых флуктуаций инфляционная космология даёт объяснение: инфляционное расширение растягивает мелкую неоднородную квантовую рябь и делает её ясно видимой на небе.

В течение нескольких миллиардов лет, прошедших с окончания краткой инфляционной фазы, благодаря гравитационному притяжению эти мельчайшие сгущения материи продолжали расти. Точно так же, как в картине стандартного Большого взрыва, сгущения имеют немного более сильное гравитационное притяжение, чем их окружение, так что они притягивают к себе находящуюся рядом материю, вырастая всё больше. Со временем эти сгустки материи выросли до достаточно больших размеров, чтобы дать материал для формирования галактик и звёзд, их населяющих. [67] Определённо, имеется *огромное* количество шагов в детальной картине пути от маленьких неоднородностей к галактикам, и многие всё ещё требуют объяснения. Но общие рамки понятны: в квантовом мире ничего не бывает совершенно однородным из-за флуктуаций, присущих принципу неопределённости. И в квантовом мире, который пережил инфляционное расширение, такие неоднородности могли быть растянуты из микромасштабов до гораздо больших размеров, обеспечив семена для формирования больших астрофизических тел вроде галактик.

В этом состоит основная идея, так что можете свободно пропустить данный абзац. Но для тех, кому интересно, я хотел бы обсудить это более точно. Вспомним, что инфляционное расширение подходит к завершению, когда величина поля инфлатона соскальзывает на дно чаши потенциальной энергии и поле теряет всю содержащуюся в нём энергию и отрицательное давление. Мы описывали это как происходящее однородно во всём пространстве, — величина инфлатона здесь, там и везде переживала одну и ту же эволюцию, — как это естественно следует из уравнений, описывающих процесс. Однако это вполне верно, только если мы пренебрегаем эффектами квантовой механики. В среднем величина поля инфлатона действительно соскальзывает на дно чаши, как мы и ожидаем, думая о нём как о классическом объекте вроде твёрдого шарика, скатывающегося по наклонной плоскости. Но так же как лягушка, сползая на дно чаши, может прыгать и дёргаться по пути, квантовая механика говорит нам, что поле инфлатона тоже прыгает и дрожит. На своём пути на дно чаши энергии величина поля может внезапно подпрыгивать немного вверх или опуститься немного вниз. Из-за этого дрожания инфлатон достигнет величины, соответствующей минимуму энергии, в разных

местах немного в разные моменты времени. Получается, что инфляционное расширение прекращается немного в разные моменты в разных точках пространства, так что и величина расширения пространства в разных местах будет немного разной, приводя к неоднородностям (ряби), сходным с теми неровностями, которые получаются, когда тесто для пиццы растягивают немного больше в одном месте, чем в другом. Теперь обычная интуиция говорит, что дрожания, возникающие благодаря квантовой механике, должны быть слишком малыми и не могут иметь какого-то отношения к астрофизическим расстояниям. Но при инфляции пространство расширяется с такой колоссальной скоростью, удваивая размер каждые 10^{-37} с, что даже малейшее отличие в продолжительности инфляции в соседних точках приводит к существенной ряби. Фактически, расчёты, проделанные для частных случаев инфляционной теории, показывают, что такие неоднородности имеют тенденцию становиться даже слишком большими; исследователям часто приходится подгонять детали в данной инфляционной модели (точную форму чаши потенциальной энергии поля инфлатона), чтобы квантовая дрожь не приводила к слишком неоднородной Вселенной. Итак, инфляционная космология даёт готовый механизм, который позволяет понять, как маломасштабные неоднородности могут отвечать за возникновение структур вроде звёзд и галактик во Вселенной, которая на самых больших масштабах выглядит совершенно однородной.

Согласно инфляционной теории более чем 100 млрд галактик, сияющих в пространстве как небесные бриллианты, являются не чем иным, как росписью квантовой механики. По моему мнению, осознание этого является одним из величайших чудес современной научной эпохи.

Золотой век космологии

Впечатляющее доказательство этих идей исходит из прецизионных спутниковых наблюдений температуры микроволнового фонового излучения. Я неоднократно подчёркивал, что температура излучения в одной части неба совпадает с температурой в другой части с высокой точностью. Но сейчас я хочу отметить, что в четвёртом знаке после запятой температура различных областей *является* разной. Точные измерения, впервые^[68] выполненные в 1992 г. на спутнике COBE (the COsmic Background Explorer — исследователь космического фона) и совсем недавно на спутнике WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe — зонд

для изучения реликтового излучения имени Вилкинсона), показали, что в то время как в одной области пространства температура может быть 2,7249 К, в другой области она может быть 2,7250 К, а в третьей — 2,7251 К.

Самым удивительным является то, что эти крайне малые температурные вариации следуют закону, который может быть объяснён, если связать его с тем же механизмом, который был предложен для объяснения начала формирования галактик: с квантовыми флуктуациями, сильно растянутыми за счёт инфляции. Грубо говоря, идея состоит в том, что когда мельчайшая квантовая дрожь размазывается по огромным пространствам, получается, что она делает его немного теплее в одной области и немного холоднее в другой (фотоны, полученные из чуть более плотной области, тратят больше энергии, преодолевая немного более сильное гравитационное поле, а потому их энергия и температура немного меньше, чем у фотонов, полученных из менее плотной области). Физики провели точные вычисления, основанные на этом предположении, и получили предсказание того, как температура микроволнового излучения должна была бы меняться от места к месту на небе. Это показано на рис. 11.1а. (Хотя детали не существенны, всё же укажем, что горизонтальная ось связана с угловым расстоянием между двумя точками на небе, а вертикальная ось связана с соответствующим различием температур). На рис. 11.1б эти предсказания сравниваются со спутниковыми наблюдениями, представленными маленькими ромбиками, и, как вы можете видеть, имеется *блестящее совпадение*.



а)



Рис. 11.1. (а) Предсказание инфляционной космологией температурных вариаций микроволнового фонового излучения от одной точки на небе к другой. (б) Сравнение этого предсказания с основанными на спутниках наблюдениями

Я надеюсь, у вас перехватило дух от такого соответствия теории и наблюдения, а если нет — то, значит, я не смог передать всю удивительность этого результата. Поэтому, на всякий случай, позвольте мне ещё раз подчеркнуть, что здесь получается: телескопы, установленные на спутниках, недавно измерили температуру микроволновых фотонов, которые добирались до нас, не встречая препятствий, около 14 млрд лет. Было обнаружено, что фотоны, прибывающие с разных направлений, имеют почти одинаковую температуру, отличающуюся не более чем на несколько десятитысячных градуса. Более того, наблюдения показали, что эти крохотные различия в температуре рисуют определённую картину на небе, соответствующую упорядоченной последовательности ромбиков на рис. 11.1б. И, чудо из чудес, расчёты, проделанные сегодня на основании инфляционной схемы, способны объяснить картину этих ничтожных температурных вариаций — вариаций, возникших около 14 млрд лет назад, — и, наконец, ключом к этому объяснению является дрожь, возникающая из квантовой неопределённости. Здорово!

Этот успех убедил многих физиков в правильности инфляционной теории. И, что в равной степени важно, эти и другие точные астрономические измерения, которые стали возможными совсем недавно, позволили космологии перейти из области, основанной на спекуляциях и

предположениях, в область, твёрдо основанную на наблюдениях, — наступило такое время, которое заставило многих работающих в этой области физиков назвать его золотым веком космологии.

Создание Вселенной

С таким прогрессом у физиков возникло желание посмотреть, как далеко может зайти инфляционная космология. Может ли она, например, решить основную загадку, заключённую в вопросе Лейбница: почему вообще существует Вселенная? Пожалуй, для нашего текущего уровня понимания, это слишком много. Даже если космологическая теория смогла бы наметить дорогу к решению этого вопроса, мы могли бы спросить, почему именно эта частная теория — её допущения, её ингредиенты и уравнения — имеет отношение к делу, так что это просто сдвинуло бы вопрос о начале на один шаг дальше. Если бы наша логика каким-то образом требовала, чтобы Вселенная существовала и управлялась уникальным набором законов, тогда, возможно, мы имели бы действительно нечто убедительное. Но на сегодняшний день это только сладкие мечты.

Другой относящийся ко всему этому, хотя и менее амбициозный, вопрос гласит: откуда взялась материя/энергия, наполняющая Вселенную? Хотя инфляционная космология не даёт исчерпывающего ответа, она ставит этот вопрос новым интригующим способом.

Чтобы понять, как это происходит, представим себе огромную прямоугольную комнату, в которой снуют многие тысячи непрерывно бегающих и прыгающих детей. Представьте, что комната совершенно непроницаемая, так что ни тепло, ни энергия не могут выйти наружу, но стены комнаты могут двигаться. Когда дети непрерывно врезаются в каждую из стен комнаты — сотни за раз, и ещё сотни немедленно вслед за этим, — комната постоянно расширяется. Теперь вы можете ожидать, что, поскольку стены непроницаемы, полная энергия, заключённая в снующих детях, будет оставаться внутри расширяющейся комнаты. В конце концов, куда ей деться? Но, хотя это резонное предположение, оно не совсем верно. *Есть* одно место, куда может уходить энергия. Дети тратят энергию, каждое мгновение вколачивая её в стены, и большая часть этой энергии преобразуется в *движение стен*. Само расширение комнаты поглощает и поэтому истощает энергию детей.

Теперь представьте, что несколько проказников решили немного

изменить положение дел. Они соединили толстыми резиновыми лентами противоположные стены комнаты, движущиеся наружу. Резиновые ленты оказывают направленное внутрь, отрицательное давление на стены комнаты, которое действует в точности противоположно направленному наружу положительному давлению, которое производят дети; вместо того чтобы переводить энергию в расширение комнаты, отрицательное давление резиновых лент «всасывает» энергию расширения. Когда комната расширяется, резиновые ленты натягиваются сильнее, что означает, что *они* заключают в себе возрастающее количество энергии.

Конечно, на самом деле мы интересуемся не расширяющимися комнатами, но расширяющейся Вселенной. И наши теории говорят нам, что пространство заполнено не толпами детей и множеством резиновых лент, а, в зависимости от космологической эпохи, однородным океаном поля инфлатона или горячими обычными частицами (электронами, фотонами, протонами и т. п.). Тем не менее одно простое наблюдение позволяет применить к космологии выводы, которые мы получили для комнаты. Точно так же, как быстро движущиеся дети производят работу против направленных внутрь сил со стороны стен комнаты при расширении, быстро движущиеся частицы в нашей Вселенной работают против направленных внутрь сил, когда расширяется пространство: они работают против сил гравитации. Это наводит на мысль (и математика это подтверждает), что можно провести аналогию между Вселенной и комнатой с детьми, заменив силу гравитации стенами комнаты.

Таким образом, точно так же, как полная энергия, заключающаяся в детях, падает вследствие её постоянной перекачки в энергию стен при расширении комнаты, полная энергия, переносимая обыкновенными частицами материи и излучения, падает вследствие её постоянного *перекачивания в гравитацию*, когда расширяется Вселенная. Более того, мы видим, что точно так же, как изготовленные проказниками резиновые ленты создают отрицательное давление внутри расширяющейся комнаты, однородное поле инфлатона создаёт отрицательное давление внутри расширяющейся Вселенной. Поэтому точно так же, как полная энергия, содержащаяся в резиновых лентах, возрастает при расширении комнаты, поскольку она отбирает энергию у его стен, полная энергия, заключённая в поле инфлатона, возрастает, когда Вселенная расширяется, поскольку *оно* *извлекает энергию из гравитации*.^[69]

Суммируем: *когда Вселенная расширяется, материя и излучение теряют энергию, отдавая её гравитации, в то время как поле инфлатона*

извлекает энергию из гравитации. [70]

Жизненно важное значение наблюдений становится ясно, когда мы пытаемся объяснить происхождение материи и излучения, из которых состоят галактики, звёзды и всё остальное, чем населён космос. В стандартной теории Большого взрыва материя/энергия, заключённая в материи и излучении, постоянно уменьшается при расширении Вселенной, так что материя/энергия в ранней Вселенной намного превышала то, что мы видим сегодня. Следовательно, вместо того чтобы предложить объяснение, откуда взялась вся материя/энергия, в настоящее время населяющая Вселенную, стандартная модель Большого взрыва ведёт бесконечную изнуряющую битву: чем дальше в прошлое заглядывает теория, тем больше материи/энергии она должна как-то объяснить.

Однако в инфляционной космологии верно почти противоположное. Напомним: инфляционная теория утверждает, что материя и излучение возникли в конце инфляционной фазы, когда поле инфлатона выделило заключающуюся в нём энергию, скатившись с возвышения на дно своей чаши потенциальной энергии. Следовательно, правильно поставленный вопрос будет звучать так: может ли теория объяснить содержание в поле инфлатона, в тот момент, когда инфляция подошла к концу, столь громадного количества материи/энергии, которое необходимо, чтобы породить всю материю и излучение, содержащиеся в современной Вселенной?

Ответ на этот вопрос таков: инфляция может легко это сделать, даже особо не утруждаясь. Как уже объяснялось, поле инфлатона является гравитационным паразитом — оно питается гравитацией, — так что полная энергия поля инфлатона возрастает, по мере того как пространство расширяется. Более точно, математика показывает, что плотность энергии поля инфлатона остаётся постоянной в течение фазы быстрого инфляционного расширения, откуда следует, что заключённая в нём полная энергия растёт прямо пропорционально объёму заполненного им пространства. В предыдущей главе мы видели, что размер Вселенной в ходе инфляции возрастает как минимум в 10^{30} раз, а это означает, что объём Вселенной возрастает по меньшей мере в $(10^{30})^3 = 10^{90}$ раз. Соответственно, заключённая в поле инфлатона энергия возрастет в то же гигантское число раз: когда инфляционная фаза подходит к концу, примерно через 10^{-35} с после её начала, энергия поля инфлатона возрастает по порядку в 10^{90} раз, если не больше. *Это означает, что в начале инфляции полю инфлатона не нужно иметь много энергии, поскольку*

гигантское расширение, порождённое инфлатоном, гигантски увеличит заключённую в нём энергию. Простой расчёт показывает, что крохотный кусочек пространства, порядка 10^{-26} см в поперечнике, заполненный однородным полем инфлатона — и весящий всего десять килограммов — в ходе последующего инфляционного расширения приобретает такое количество энергии, которого хватает на всё, что мы видим во Вселенной сегодня. [\[149\]](#)

Таким образом, в полной противоположности со стандартной теорией Большого взрыва, в которой полная материя/энергия ранней Вселенной была невыразимо огромной, инфляционная космология путём «разработки залежей» гравитации может произвести всю обыкновенную материю и излучение Вселенной из крохотного десятикилограммового кусочка заполненного инфлатоном пространства. Это ни в коем случае не отвечает на вопрос Лейбница о том, почему существует нечто вместо ничего, так как ещё необходимо объяснить, почему имелся инфлатон или даже само пространство, которое он занимал. Но то, что всё ещё требует объяснения, весит много меньше, чем моя собака Рокки, и это определённо совсем другая стартовая позиция по сравнению с той, что предусмотрена стандартной моделью Большого взрыва [\[71\]](#).

Инфляция, гладкость и стрела времени

Может быть мой энтузиазм уже выдал мои пристрастия, но из всех успехов, которые наука достигла в наше время, достижения космологии наполняют меня наибольшим трепетом и смирением. Мне кажется, я никогда не утрачивал то возбуждение, которое я первый раз испытал много лет назад, когда впервые изучал основы общей теории относительности и понял, что из нашего крохотного уголка пространства-времени, применив теорию Эйнштейна, мы можем изучать эволюцию всего космоса. Теперь, несколько десятилетий спустя, технологический прогресс позволил подвергнуть эти некогда абстрактные предположения о поведении Вселенной в свои самые ранние моменты проверке наблюдениями, и теория на самом деле работает.

Напомним, однако, что помимо общей важности космологии для понимания пространства и времени, в главах 6 и 7 мы взяли за изучение ранней истории Вселенной со специальной целью: найти истоки стрелы времени. Вспомним из этих глав, что единственные убедительные рамки, которые мы нашли для объяснения стрелы времени, заключались в том, что

ранняя Вселенная была чрезвычайно упорядоченной, т. е. имела экстремально низкую энтропию, что сделало возможным будущее, в котором энтропия всегда увеличивается. Точно так же, как страницы романа «*Война и мир*» невозможно было бы привести в состояние большего беспорядка, если бы они не были в некоторый момент аккуратно сложены, так и Вселенная тоже не обладала бы способностью становиться всё более разупорядоченной — молоко не могло бы разливаться, яйца не могли разбиваться, люди стареть — без того, чтобы она имела высокоупорядоченную конфигурацию в начале. Загадка, с которой мы столкнулись, заключается в объяснении, как могла возникнуть эта высокоупорядоченная низкоэнтропийная стартовая точка.

Инфляционная космология предлагает существенный прогресс в этом вопросе, но позвольте мне сначала более точно напомнить вам загадку на случай, если некоторые существенные детали ускользнули от вашего внимания.

Имеются убедительные свидетельства, что в ранней истории Вселенной материя была распределена по пространству однородно. Как правило, это соответствует высокоэнтропийной конфигурации — вроде молекул углекислого газа, разлетевшихся по всей комнате из бутылки колы, — и потому могло бы оказаться настолько банальным, что едва ли потребовало объяснения. Но когда существенна гравитация, как это имеет место при рассмотрении целой Вселенной, однородное распределение материи является редкой, низкоэнтропийной, высокоупорядоченной конфигурацией, поскольку гравитация заставляет материю собираться в отдельные сгустки. Аналогично, гладкое и однородное пространство также имеет очень низкую энтропию; оно является высокоупорядоченным по сравнению с пространством, характеризующимся безумно скачущей, неоднородной пространственной кривизной. (Точно так же, как для страниц романа «*Война и мир*» имеется много способов быть разупорядоченными, но только один способ быть упорядоченными, имеется много способов для пространства иметь разупорядоченную, неоднородную форму, но очень мало способов, в которых оно может быть упорядоченным, гладким и однородным.) Так что мы остаёмся с загадкой: почему ранняя Вселенная имела низкоэнтропийное (высокоупорядоченное) распределение материи вместо высокоэнтропийного (сильно разупорядоченного) неоднородного распределения материи, такого как популяция разнообразных чёрных дыр? И почему распределение кривизны по пространству было гладким, упорядоченным и однородным с экстремально высокой точностью, а не пронизанным различными

гигантскими искажениями и замысловатыми искривлениями, вроде того, которое могло бы генерироваться чёрными дырами?

Как впервые детально продемонстрировали Пол Дэвис и Дон Пейдж, [{150}](#) инфляционная космология предлагает важный прорыв в решении этих проблем. Чтобы увидеть это, надо помнить, что существенная часть этой загадки заключается в том, что если где-то возникла избыточная концентрация вещества, то гравитационное притяжение этой скученности собирает ещё больше материала, заставляя её расти дальше; соответственно, если в пространстве сформировалась небольшая морщинка, её большее гравитационное притяжение будет стремиться сделать её ещё более глубокой, приводя к сильно неоднородной пространственной кривизне. Когда гравитация существенна, обычные, ничем не примечательные высокоэнтропийные конфигурации характеризуются неровностями и неоднородностью.

Но отметим следующее: эти рассуждения относятся исключительно к обычной *притягивающей* гравитации. Скученность и неровности растут потому, что они сильно *притягивают* окружающий материал, приглашая его присоединиться к сгустку. Однако в течение короткой инфляционной фазы гравитация была *отталкивающей*, и это всё меняет. Возьмём форму пространства. Гигантское действие отталкивающей гравитации приводит пространство к такому быстрому раздуванию, что начальные изгибы и деформации растягиваются в нечто совершенно гладкое, примерно как разглаживаются складки сморщенного воздушного шарика, когда его надувают. [\[72\]](#) И, что ещё существеннее, поскольку во время короткого инфляционного периода объём пространства возрастает в колоссальное число раз, то и плотность сгустков материи колоссально разбавляется, примерно как упала бы плотность рыбок в вашем аквариуме, если бы его объём неожиданно возрос до размеров Олимпийского плавательного бассейна. Таким образом, хотя притягивающая гравитация заставляет сгущения материи и неровности пространства расти, отталкивающая гравитация действует противоположным образом: она заставляет их уменьшаться, приводя к всё более гладкому, всё более однородному результату.

Таким образом, к концу инфляционного взрыва размер Вселенной чрезвычайно вырастает, все неоднородности кривизны пространства растягиваются, и любые существующие изначально сгущения чего угодно полностью растворяются до такой степени, что они становятся совершенно несущественными. Более того, когда поле инфлатона соскальзывает на дно

чаши потенциальной энергии, приводя к завершению инфляционного взрыва, оно конвертирует заключённую в нём энергию в почти однородное море частиц обычной материи во всём пространстве (выравнивая всё с точностью до мелких, но критически важных неоднородностей, происходящих от квантовых флуктуаций). В целом всё это выглядит как существенный прогресс. Результат, которого мы достигли с помощью инфляции, — *гладкое, однородное расширение пространства, населённого почти однородно распределённой материей*, — это в точности то, что мы пытались объяснить. Это в точности низкоэнтропийная конфигурация, которая нам была нужна для объяснения стрелы времени.

Энтропия и инфляция

Действительно, это существенный прогресс. Но остаются две важные проблемы.

Во-первых, мы, кажется, пришли к заключению, что инфляционный взрыв всё разглаживает и поэтому снижает полную энтропию, реализуя физический механизм, — не просто статистическую флуктуацию, — который выглядит как нарушающий второй закон термодинамики. Если это так, то либо наше понимание второго закона, либо наши текущие рассуждения должны быть неверными. В действительности, однако, нам не придётся иметь дела ни с одним из этих вариантов, поскольку полная энтропия в результате инфляции не уменьшается. Что реально произошло в ходе инфляционного взрыва, так это то, что полная энтропия возросла, но возросла *намного меньше, чем могла бы*. Вы видите, что к концу инфляционного взрыва пространство растянулось, став совершенно гладким, так что вклад гравитации в энтропию — в энтропию, связанную с возможной неровной, неупорядоченной, неоднородной формой пространства, — был минимален. Однако когда поле инфлатона соскользнуло на дно своей чаши и высвободило запасённую энергию, можно оценить, что оно произвело около 10^{80} частиц материи и излучения. Такое огромное количество частиц, как и книга с огромным числом страниц, включает в себе огромное количество энтропии. Таким образом, хотя гравитационная энтропия снизилась, рост энтропии от производства всех этих частиц более чем компенсирует такое снижение. Полная энтропия возросла, точно так, как мы ожидали в соответствии со вторым законом термодинамики.

Но, и это важный момент, инфляционный взрыв в результате

разглаживания пространства и образования однородного, низкоэнтропийного гравитационного поля создаёт огромный зазор между тем, каким был вклад гравитации в энтропию, и тем, каким он мог бы быть. Полная энтропия возросла во время инфляции, но на крайне незначительную величину по сравнению с тем, насколько она могла бы возрасти. Именно в этом смысле инфляция сгенерировала низкоэнтропийную Вселенную: к концу инфляции энтропия возросла далеко не на тот множитель, на который возросла пространственная протяжённость. Если энтропию сравнить с налогом на имущество, это было бы примерно как если бы к Нью-Йорку присоединили пустыню Сахару. Полный налог на имущество возрос бы, но на величину, крохотную по сравнению с полным ростом площади.

Всё время с момента завершения инфляции гравитация пытается наверстать упущенное. Каждое сгущение материи — будь то галактика, звезда в галактике, планета или чёрная дыра, — которое гравитация выудила из однородности, характеризуется растущей энтропией и ведёт гравитацию шаг за шагом всё ближе к реализации её энтропийного потенциала. В этом смысле инфляция представляет собой механизм, который создаёт большую Вселенную с относительно низкой гравитационной энтропией и, таким образом, создаёт основу для последующих миллиардов лет гравитационного сгущения материи, которое приводит к тому, свидетелями чего мы сегодня являемся. Таким образом, инфляционная космология задаёт направление стреле времени путём создания прошлого с чрезвычайно низкой гравитационной энтропией; будущее является направлением, в котором эта энтропия возрастает. [\[151\]](#)

Вторая проблема становится очевидной, когда мы пойдём по пути, по которому вела нас стрела времени в главе 6. От яйца к курице, которая его снесла, к корму этой курицы, к растительному миру, к солнечному теплу и свету, к изначально однородно распределённому газу Большого взрыва — мы следовали за эволюцией Вселенной в прошлое, которое имело всегда больший порядок, на каждом этапе сдвигая загадку низкой энтропии на один шаг дальше назад во времени. Мы только что поняли, что только ещё более ранний этап истории Вселенной — этап инфляционного расширения — может естественно объяснить гладкие и однородные условия во Вселенной после взрыва. Но как насчёт самого инфлатона? Можем ли мы объяснить первое звено в той цепочке, которой мы следовали? Можем ли мы объяснить, почему вообще сложились условия, необходимые для инфляционного взрыва?

Это проблема наибольшей важности. Независимо от того, сколько загадок инфляционная космология решает в теории, если эра инфляционного расширения никогда не имела место, подход будет признан неадекватным. Более того, поскольку мы не можем вернуться в раннюю Вселенную и прямо определить, была ли инфляция, оценка того, имеем ли мы реальный прогресс в понимании направления стрелы времени, требует, чтобы мы определили *степень правдоподобия* того, что условия, необходимые для инфляционного взрыва, имели место. То есть физиков раздражает полная зависимость стандартной модели Большого взрыва от тонко настроенных однородных начальных условий, которые, будучи мотивированы наблюдениями, не объяснены теоретически. Кажется глубоко неудовлетворительным просто допустить низкоэнтропийное состояние ранней Вселенной; кажется, что очень глупо установить во Вселенной стрелу времени без какого-либо объяснения. На первый взгляд инфляция означает прогресс в понимании, показывая, что то, что предполагается в стандартной модели Большого взрыва, возникает в инфляционной эволюции. Но если инициирование инфляции требует новых, очень специальных, чрезвычайно низкоэнтропийных условий, мы вернулись бы на прежнее место. Мы просто поменяли бы специальные начальные условия модели Большого взрыва на специальные начальные условия, необходимые для запуска инфляции, и загадка стрелы времени осталась бы той же загадкой.

Какие условия необходимы для начала инфляции? Мы видели, что инфляция является неизбежным результатом задержки величины поля инфлатона на высокоэнергетическом плато в его чаше потенциальной энергии на микроскопическое время и в крохотной области. Наша задача, следовательно, заключается в определении, насколько вероятной в действительности является такая начальная конфигурация. Если инфляцию запустить легко, мы окажемся в выигрышном положении. Но если достижение требуемых условий чрезвычайно маловероятно, мы просто сдвинем вопрос о стреле времени дальше ещё на один шаг назад — к поиску объяснения низкоэнтропийной конфигурации поля инфлатона, с которого всё начинается.

Я сначала опишу современные соображения по этой проблеме в наиболее оптимистичном свете, а затем вернусь к некоторым существенным деталям, которые остаются в тумане.

Больцман возвращается

Как отмечалось в предыдущей главе, об инфляционном взрыве лучше думать как о событии в существовавшей ещё до того Вселенной, а не как о создании самой Вселенной. Хотя мы не имеем неоспоримого понимания того, на что Вселенная была похожа в течение предынфляционной эры, посмотрим, как далеко мы можем зайти, если предположим, что вещи пребывали в наиболее обычном, высокоэнтропийном состоянии. В частности, представим, что изначальное предынфляционное пространство было напичкано деформациями и изгибами и что поле инфлатона также было сильно разупорядочено, его величина прыгала туда-сюда подобно лягушке в горячей металлической чаше.

Теперь, точно так же, как вы можете ожидать, что при настойчивой игре на честно отрегулированном игровом автомате рано или поздно на случайным образом вращающихся барабанах выпадут три семёрки, мы ожидаем, что рано или поздно случайные флуктуации на этой высокоэнергетической турбулентной арене изначальной Вселенной заставят величину поля инфлатона прыгнуть к правильной и однородной величине в некотором маленьком кусочке пространства, инициировав взрыв инфляционного расширения. Как объяснялось в предыдущем разделе, расчёты показывают, что кусочку пространства необходимо быть исключительно маленьким — порядка 10^{-26} см в поперечнике, — чтобы инициировать космологическое расширение (инфляционное расширение, за которым следует стандартное расширение Большого взрыва), которое растянет этот кусочек до величины больше, чем Вселенная, которую мы видим сегодня. Таким образом, вместо допущения или просто декларирования, что условия в ранней Вселенной были такими, чтобы инфляционное расширение имело место, в таком способе размышлений необходимые условия возникают благодаря ультрамикроскопической флуктуации, весом не более десяти килограммов, возникающей внутри обыкновенной, ничем не примечательной среды, находящейся в состоянии беспорядка.

Более того, точно так же, как игровой автомат будет генерировать большое разнообразие результатов без выигрыша, в других областях изначального пространства будут происходить и другие виды флуктуаций инфлатона. В большинстве случаев флуктуации не будут иметь нужную величину или не будут достаточно однородными для начала инфляции. (Даже в области, имеющей не более 10^{-26} см в поперечнике, величина поля может изменяться со страшной силой.) Но всё, что для нас имеет значение, это то, что был один кусочек, который привёл к разглаживающему

пространство инфляционному взрыву, ставшему первым звеном в низкоэнтропийной цепочке, в конце концов ведущей к нашему привычному космосу. Поскольку мы видим одну-единственную нашу большую Вселенную, нам нужно, чтобы космический игровой автомат дал выигрыш только один раз. ^[152]

Поскольку мы проследили Вселенную назад к статистической флуктуации в первичном хаосе, это объяснение стрелы времени перекликается с некоторыми особенностями оригинального предположения Больцмана. Вспомним из главы 6 идею Больцмана, что всё, сейчас видимое нами, возникло как редкая флуктуация в полном беспорядке. Однако проблема с исходной формулировкой Больцмана заключалась в том, что она не могла объяснить, почему случайная флуктуация оказалась так далека от хаоса и произвела Вселенную, гораздо более упорядоченную, чем это было необходимо, чтобы поддержать жизнь, как мы её знаем. Почему Вселенная так велика, что имеет миллиарды и миллиарды галактик, каждая из которых имеет миллиарды и миллиарды звёзд, когда она могла бы быть куда более скромной, имея, скажем, всего несколько галактик или даже одну-единственную?

Со статистической точки зрения более скромная флуктуация, которая произвела бы некоторое количество порядка, но не такое значительное, как мы сейчас видим, была бы *намного* более вероятной. Более того, поскольку в среднем энтропия возрастает, рассуждения Больцмана показывают, что было бы ещё *намного* более вероятным, что всё, что мы сегодня видим, появилось *сию минуту* как редкий статистический скачок к низкой энтропии. Повторим аргумент: чем в более далёком прошлом произошла флуктуация, тем более низкой энтропии она должна была бы достигнуть (энтропия начинает расти после любого падения к низкой величине, как на рис. 6.4; так, если флуктуация произошла вчера, она должна была достичь вчерашнего низкого значения энтропии, а если она произошла миллиард лет назад, она должна была упасть к ещё более низкой энтропии той эры). Поэтому чем дальше назад во времени, тем более глубокой и невероятной должна быть требуемая флуктуация. Поэтому наиболее вероятно, что флуктуация произошла только что. Но если мы принимаем это заключение, мы не можем доверять своей памяти, записям или даже законам физики, которые лежат в основе самой дискуссии — это совершенно неприемлемая позиция.

Огромное преимущество инфляционного воплощения идеи Больцмана заключается в том, что *малая* флуктуация — вполне ординарный скачок к подходящим условиям в *крошечном* клочке пространства — сразу и

неизбежно даёт гигантскую и упорядоченную Вселенную, которую мы знаем. Уж если инфляционное расширение началось, крошечный клочок будет *неумолимо* растянут до масштабов, по меньшей мере таких, как у Вселенной, которую мы в настоящее время видим, а потому нет загадки в том, что Вселенная не является крошечным уголком; нет загадки, что Вселенная так обширна и населена огромным числом галактик. С самого начала инфляция предложила Вселенной страшно выгодную сделку. Скачок к более низкой энтропии внутри ультрамикроскопического кусочка пространства был использован для инфляционного расширения в широчайшие просторы космоса. И, что самое важное, инфляционное растяжение не просто дало некоторую большую Вселенную. Оно дало *нашу* большую Вселенную — инфляция объясняет форму пространства, она объясняет крупномасштабную однородность, и она даже объясняет «мелкомасштабные» неоднородности, такие как галактики и вариации температуры фонового излучения. Инфляция упаковывает всё богатство объяснительной и предсказательной силы в единственную флуктуацию к низкой энтропии.

Итак, Больцман вполне мог быть прав. Всё, что мы видим, могло произойти от случайной флуктуации высокоразупорядоченного состояния первичного хаоса. Однако при такой реализации его идей мы можем верить нашим записям и мы можем верить нашей памяти: флуктуация произошла не только что. Прошлое действительно происходило. Наши записи — это записи о том, что действительно имело место. Инфляционное расширение умножило крошечную крупинку порядка в ранней Вселенной — оно «завело» Вселенную на гигантское расширение с минимальной гравитационной энтропией, — так что 14 млрд лет последующего раскручивания, последующей концентрации вещества в галактики, звёзды, планеты не представляют загадки.

Фактически этот подход говорит нам даже чуть больше. Точно так же, как можно сорвать куш на нескольких игровых автоматах в казино «Белладжио» (Лас-Вегас), в изначальном состоянии высокой энтропии и полного хаоса нет никаких причин, по которым необходимые для инфляционного расширения условия могли бы появиться только в единственном отдельно взятом кусочке пространства. Напротив, как предположил Андрей Линде, там могло бы быть множество кусочков, разбросанных тут и там, которые подвергаются разглаживающему пространству инфляционному расширению. Если это так, наша Вселенная становится лишь одной среди многих вселенных, которые прорастали — и, вероятно, продолжают прорастать, — когда случайные флуктуации

создавали условия, подходящие для инфляционного взрыва, как показано на рис. 11.2. Так как другие вселенные, вероятно, всегда будут отделены от нашей, трудно себе представить, как мы когда-либо сможем установить, является ли эта картина «мультиверса» правильной. Однако как концептуальная схема она является и богатой, и привлекательной. Среди прочего, она предлагает возможный сдвиг в нашем понимании космологии: в главе 10 я описал инфляцию как «интерфейс» к стандартной теории Большого взрыва, в котором Взрыв идентифицировался с мимолётной вспышкой быстрого расширения. Но если мы думаем об инфляционном прорастании каждой новой Вселенной (рис. 11.2) как о её собственном Взрыве, тогда саму инфляцию лучше всего представлять как некие всеобъемлющие космологические рамки, в которых, пузырь за пузырём, происходят эволюции вроде эволюции нашего Большого взрыва. Таким образом, вместо того чтобы рассматривать инфляцию как часть стандартной теории Большого взрыва, в этом подходе сам стандартный Большой взрыв мог бы рассматриваться как часть инфляции.

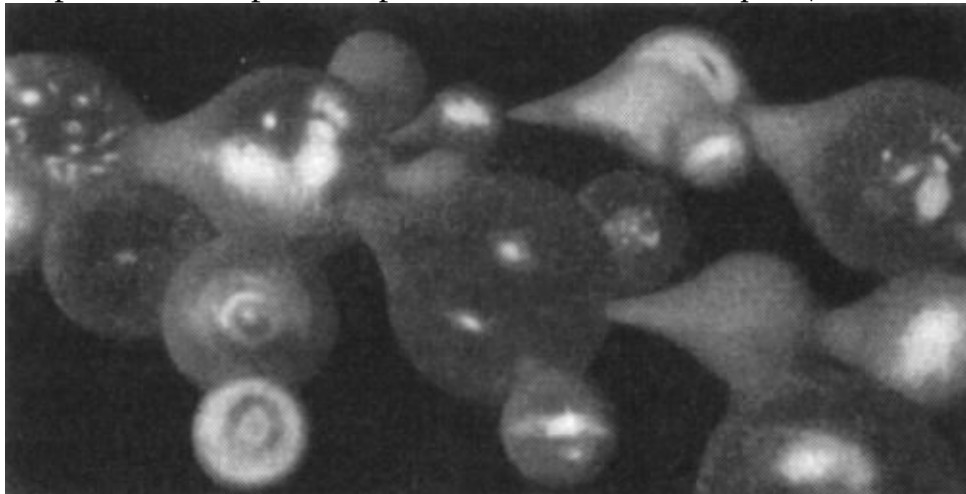


Рис. 11.2. Инфляция может возникать многократно, вырастая новые вселенные из правселенной

Инфляция и яйцо

Так почему яйцо разбивается, но не соединяется в целое? Откуда приходит стрела времени, которую мы все ощущаем? Здесь предложенный подход нас спасает. Благодаря случайной флуктуации из ничем не примечательного начального состояния с высокой энтропией крохотный кусочек пространства весом десять килограммов достигает условий,

которые приводят к короткому взрыву инфляционного расширения. Чудовищное раздувание приводит к колоссальному растяжению и разглаживанию пространства, и, когда взрыв подходит к концу, поле инфлатона освобождается от своей гигантски выросшей энергии, почти однородно заполняя пространство материей и излучением. Когда инфляционная отталкивающая гравитация убывает, обычная притягивающая гравитация становится доминирующей. И, как мы видели, притягивающая гравитация использует маленькие неоднородности, вызванные квантовыми флуктуациями, чтобы заставить материю скучиваться, формируя галактики и звёзды и в конечном счёте ведя к образованию Солнца, Земли и остальной Солнечной системы, а также других структур в нашей наблюдаемой Вселенной. (Как упоминалось, примерно через 7 млрд лет после Большого взрыва отталкивающая гравитация снова стала доминировать, но это имеет отношение только к самым большим космическим масштабам и не сказывается непосредственно на более мелких образованиях вроде отдельных галактик или нашей Солнечной системы, где по-прежнему царствует обычная притягивающая гравитация). Относительно низкоэнтропийная солнечная энергия используется низкоэнтропийными растительными и животными формами жизни на Земле, чтобы производить ещё более низкоэнтропийные формы жизни, медленно увеличивая полную энтропию через тепло и отходы. В конечном счёте эта цепочка произвела курицу, которая снесла яйцо, — и мы знаем конец истории: яйцо скатилось с вашего кухонного стола, разбилось и расплескалось по полу как часть неотвратимого движения Вселенной к более высокой энтропии. Такова низкоэнтропийная, высокоупорядоченная, однородно гладкая природа ткани пространства, созданной инфляционным расширением, что является аналогом расположения страниц романа *«Война и мир»* в правильном числовом порядке; это то самое раннее состояние высокого порядка — отсутствие значительных неровностей и деформаций или огромных чёрных дыр, — которое даёт начало Вселенной с её последующей эволюцией к более высокой энтропии и поэтому обеспечивает стрелу времени, которую мы ощущаем. На нашем сегодняшнем уровне понимания это наиболее полное объяснение стрелы времени из всех тех, что были даны.

Ложка дёгтя в бочке мёда?

Для меня эта история инфляционной космологии и стрелы времени

является восхитительной. В диком и необузданном царстве изначального хаоса возникла ультрамикроскопическая флуктуация однородного поля инфлатона весом намного меньше, чем лимит ручной клади. Это инициировало инфляционное расширение, которое задало направление стреле времени, а остальное и есть история.

Но в нашем рассказе мы сделали центральное допущение, которое всё ещё не подтверждено. Чтобы оценить правдоподобие того, что инфляция могла начаться, нам пришлось задать характеристики прединфляционной среды, из которой могло возникнуть инфляционное расширение. Та конкретная среда, которую мы себе представляли, — дикая, хаотическая, энергичная — выглядит разумно, но придание этому интуитивному описанию математической точности выглядит совсем не простым. Более того, всё это было только догадкой. Текущее состояние дел пока состоит в том, что мы не знаем, какие условия были в предполагаемом прединфляционном царстве, в размытом пятне на рис. 10.3, а без этой информации мы не в состоянии дать убедительную оценку правдоподобия возникновения инфляции; любое вычисление вероятности чувствительно к сделанным нами предположениям. [\[153\]](#)

С учётом этого пробела в нашем понимании самое здоровое обобщение всего сказанного выше заключается в том, что инфляция предлагает мощные объяснительные рамки, в которых связываются вместе проблемы, кажущиеся несопоставимыми — проблема горизонта, проблема плоскостности, проблема происхождения структур (галактики, неоднородности температуры фонового излучения), проблема низкой энтропии ранней Вселенной — и предлагается единое решение всех этих проблем. Чувствуется, что это правильно. Но, чтобы сделать следующий шаг, нам нужна теория, которая может справиться с экстремальными условиями, характеризующими наше размытое пятно, — экстремальными по температуре и колоссальной плотности, — тогда мы создадим возможность достичь однозначного понимания самых ранних моментов космоса.

Как мы узнаем в следующей главе, для этого нужна теория, которая смогла бы преодолеть, возможно, величайшую проблему теоретической физики, которая стоит перед нами на протяжении последних восьмидесяти лет: фундаментальную несовместимость общей теории относительности и квантовой механики. Многие исследователи верят, что это может быть достигнуто в относительно новом подходе, называемом *теорией суперструн*, но если теория суперструн действительно верна, ткань космоса окажется много более странной, чем кто-либо себе представлял.

Часть IV. Истоки и объединение

Глава 12. Мир на струне

Ткань Вселенной в теории струн

Представьте Вселенную, в которой, чтобы понять что-либо, вам необходимо понять всё. Вселенная, в которой, чтобы сказать что-нибудь о причинах вращения планеты вокруг звезды, почему бейсбольный мяч летит по определённой траектории, как работает магнит или батарея, как действует свет или гравитация (в общем, сказать что-нибудь о чём-нибудь), вам было бы необходимо открыть самые фундаментальные законы и определить, как они действуют на тончайшие составляющие материи. К счастью, это не наша Вселенная.

Если бы было так, трудно было бы представить, как наука вообще могла бы развиваться. В течение столетий причина, по которой мы были в состоянии двигаться вперёд, состояла в том, что мы могли делать своё дело постепенно; мы были в состоянии распутывать тайны шаг за шагом, с каждым новым открытием продвигаясь чуть глубже, чем раньше. Ньютону не нужно было знать об атомах, чтобы сделать великие шаги в понимании движения и гравитации. Максвеллу не нужно было знать про электроны и другие заряженные частицы, чтобы разработать мощную теорию электромагнетизма. Эйнштейну не нужно было обращаться к изначальному виду пространства и времени, чтобы сформулировать теорию о том, как они искривляются гравитацией. Каждое из этих открытий, точно так же, как многие другие, которые заложили основу наших современных представлений о космосе, действовали в рамках ограниченного контекста, который оставлял без ответа многие основополагающие вопросы. Каждое открытие было в состоянии внести свой собственный кусочек в головоломку, хотя никто не знал — и мы всё ещё не знаем, — какая великая общая картина включает в себе все кусочки головоломки.

И хотя сегодня наука сильно отличается от науки даже пятьдесят лет назад, было бы неоправданным упрощением суммировать научный прогресс в терминах новых теорий, низвергнувших своих предшественниц. Более правильное описание заключается в том, что каждая новая теория уточняет свою предшественницу, обеспечивая более точные и охватывающие большую область рамки. Ньютоновская теория гравитации была замещена общей теорией относительности Эйнштейна, но было бы наивным говорить, что ньютоновская теория неверна. Для объектов, которые не двигаются с околосветовыми скоростями и не создают таких

сильных гравитационных полей, как у чёрных дыр, теория Ньютона потрясающе точна. Это вовсе не означает, что теория Эйнштейна является немного изменённым вариантом ньютоновской теории; в ходе усовершенствования ньютоновского подхода к гравитации Эйнштейн выработал совершенно новую концептуальную схему, которая радикально изменяет наше понимание пространства и времени. Но сила открытия Ньютона в рамках той области, для которой он его предназначал (движение планет, обычные земные движения и т. д.), полностью сохраняется.

Мы представляем каждую новую теорию как подводящую нас ближе к ускользающей цели достижения истины, но существует ли конечная теория — теория, которая не может быть дальше уточнена, поскольку она полностью описывает работу Вселенной на самом глубоком возможном уровне, — на этот вопрос никто не может ответить. Несмотря на это, картина, вырисовывающаяся в течение последних трёхсот лет открытий, даёт дразнящие свидетельства, что такая теория может быть разработана. В общих чертах, каждый новый прорыв собирает более широкий спектр физических явлений под всё меньшим числом теоретических зонтиков. Открытия Ньютона показали, что силы, управляющие движением планет, являются теми же силами, которые управляют движением падающих объектов здесь, на Земле. Открытия Максвелла показали, что электричество и магнетизм являются двумя сторонами одной монеты. Открытия Эйнштейна показали, что пространство и время так же неразделимы, как прикосновение Мидаса и золото. Открытия поколения физиков в начале XX в. установили, что мириады загадок микрофизики могут быть объяснены путём аккуратного использования квантовой механики. Позднее открытия Глэшоу, Салама и Вайнберга показали, что электромагнетизм и слабое ядерное взаимодействие являются двумя проявлениями единого взаимодействия — электрослабого взаимодействия — и имеются даже предварительные, косвенные свидетельства, что сильное ядерное взаимодействие может быть объединено с электрослабым в ещё более великом синтезе.^{154} Собирая всё это вместе, мы видим картину, которая показывает движение от сложности к простоте, от разделения к единству. Направления объяснений кажутся сходящимися в одну мощную схему, которую ещё предстоит открыть и которая объединит все силы природы и всю материю в рамках единственной теории, способной описать все физические явления.

Альберт Эйнштейн, который более трёх десятилетий пытался объединить электромагнетизм и общую теорию относительности в одну теорию, заслуженно считается родоначальником современных поисков

единой теории. В течение этих долгих десятилетий он был единственным исследователем такой единой теории, и его страстные, хотя и одинокие поиски отдалили его от основных интересов физического сообщества. Однако в течение последних двадцати лет произошло радикальное возрождение поисков единой теории; одинокие мечты Эйнштейна стали движущей силой для целого поколения физиков. Но из-за открытий, произошедших со времён Эйнштейна, фокус поисков сместился. Хотя мы ещё и не имеем успешной теории, объединяющей сильное и электрослабое взаимодействие, но все эти три вида сил (электромагнитные, слабые, сильные) описываются на одном языке, основанном на квантовой механике. Однако общая теория относительности, наша наиболее совершенная теория четвёртой силы, стоит в стороне от этой схемы. Общая теория относительности является классической теорией: она не включает никакие вероятностные концепции квантовой теории. Главная цель современной программы унификации заключается, следовательно, в объединении общей теории относительности и квантовой механики и в описании всех четырёх сил в одних и тех же квантово-механических рамках. Это оказалось одной из самых трудных проблем, с которыми когда-либо сталкивалась теоретическая физика.

Давайте посмотрим, почему.

Квантовая дрожь и пустое пространство

Если бы мне пришлось выделить одно наиболее запоминающееся свойство квантовой механики, я бы выбрал принцип неопределённости. Вероятности и волновые функции определённо обеспечивают радикально новые рамки анализа, но именно принцип неопределённости несёт в себе разрыв с классической физикой. Вспомним, что в XVII и XVIII вв. учёные были уверены, что полное описание физической реальности сводится к указанию положения и скорости каждой составляющей материи, заполняющей космос. А с появлением концепции поля в XIX в. и с её последующим применением к электромагнитным и гравитационным силам этот взгляд был дополнен включением в рассмотрение величины каждого поля — т. е. напряжённости каждого поля — и скорости изменения величины каждого поля в каждой точке пространства. Но к 1930-м гг. принцип неопределённости разрушил эту концепцию реальности, показав, что вы никогда не можете знать сразу положение и скорость частицы; вы никогда не можете знать сразу величину поля в данном месте пространства

и то, как быстро величина поля изменяется. Квантовая неопределённость запрещает это.

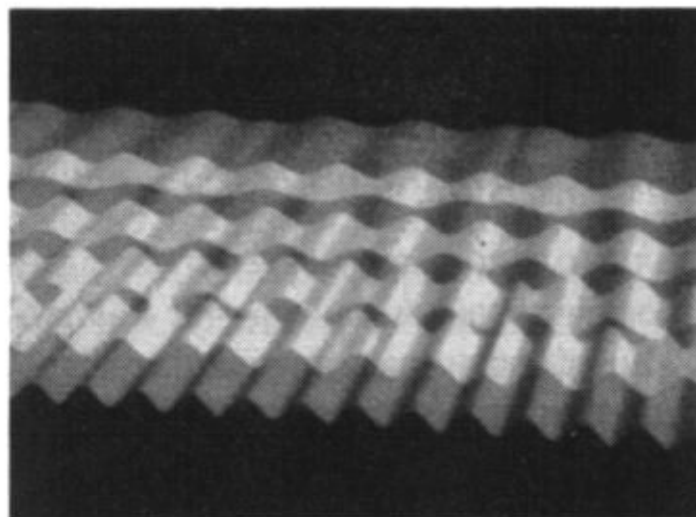
Как мы обсуждали в предыдущей главе, из-за квантовой неопределённости микромир является царством дрожания и квантовых скачков. Ранее мы обращали внимание на порождённую неопределённостью квантовую дрожь поля инфлатона, но квантовая неопределённость имеет место для всех полей. Электромагнитное поле, поля сильного и слабого ядерных взаимодействий и гравитационное поле — все подвергаются неистовым квантовым скачкам-дрожаниям на микроскопическом масштабе. Фактически, эта дрожь полей существует даже в пространстве, которое вы нормально воспринимали бы как пустое, в пространстве, которое кажется не содержащим ни материи, ни полей. Это очень важная идея, но если вы не сталкивались с ней ранее, она, естественно, будет выглядеть загадочной. Если область пространства ничего не содержит — если это вакуум, — то не означает ли это, что там нечему дрожать? Но мы уже знаем, что концепция пустоты — тонкая вещь. Просто подумайте об океане Хиггса, который, как утверждает современная теория, пронизывает пустое пространство. Квантовая дрожь, о которой я теперь говорю, только делает понятие «ничего» ещё более тонким. Вот что я имею в виду.

В доквантовой (и дохиггсовой) физике мы объявляли некоторую область пространства совершенно пустой, если она не содержит частиц и величина каждого поля всюду в области равна нулю.^[73] Теперь подумаем об этом классическом определении пустоты в свете квантового принципа неопределённости. Если бы поле имело и сохраняло нулевую величину, мы бы знали его величину — нуль, — а также скорость изменения его величины — тоже нуль. Но в соответствии с принципом неопределённости невозможно, чтобы оба эти свойства одновременно были определены. То есть, если поле в некоторый момент имеет определённую величину, нуль в нашем случае, принцип неопределённости говорит нам, что скорость его изменения совершенно случайна. А случайная скорость изменения означает, что в последующие моменты времени величина поля будет хаотически прыгать вверх и вниз, даже в месте, которое мы обычно полагаем совершенно пустым пространством. Так что интуитивное понятие пустоты как места, в котором все поля имеют и сохраняют нулевую величину, несовместимо с квантовой механикой. *Величина поля может колебаться около нулевой величины, но она не может быть равной нулю во всей области более чем краткое мгновение.*^{155} На техническом языке

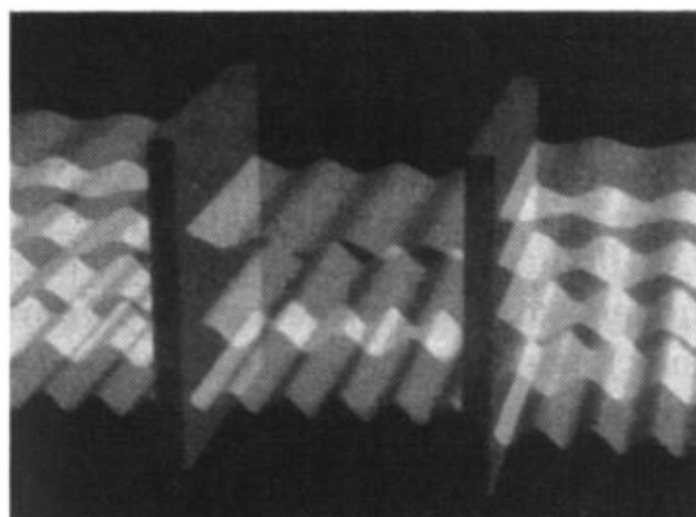
физики говорят, что поля подвержены *вакуумным флуктуациям*.

Хаотичная природа вакуумных флуктуаций поля означает, что во всех областях, за исключением самых микроскопических, имеется так же много скачков «вверх», как и «вниз», а потому они усредняются к нулю, примерно как поверхность мрамора выглядит совершенно гладкой для невооружённого глаза, хотя электронный микроскоп обнаруживает, что она очень неровная на микроскопических масштабах. Тем не менее, хотя мы не можем увидеть эту квантовую дрожь непосредственно, более чем полстолетия назад реальность колебаний квантового поля, даже в пустом пространстве, была с несомненностью показана в простом, но фундаментальном открытии.

В 1948 г. датский физик Хендрик Казимир показал, как вакуумные флуктуации электромагнитного поля могут быть обнаружены экспериментально. Квантовая теория говорит, что колебания электромагнитного поля в пустом пространстве будут иметь различную форму, как проиллюстрировано на рис. 12.1а. Прорыв Казимира заключался в осознании того, что, разместив две обычные металлические пластины в пустой области, как показано на рис. 12.1б, можно вызвать небольшую модификацию этих вакуумных колебаний поля. А именно, квантовые уравнения показывают, что в области между пластинами некоторые типы флуктуаций будут отсутствовать (допустимы только такие флуктуации электромагнитного поля, значения которых равны нулю в месте расположения каждой пластины). Казимир проанализировал следствия такого подавления колебаний поля и обнаружил нечто совершенно необычное. Как уменьшение количества воздуха в некоторой области создаёт дисбаланс давлений (например, на большой высоте вы можете почувствовать разрежение воздуха по тому, как он оказывает меньшее давление с наружной стороны ваших барабанных перепонки), уменьшение квантовых колебаний поля между пластинами также создаёт дисбаланс давления: квантовые колебания поля между пластинами становятся чуть-чуть слабее, чем вне пластин, и этот дисбаланс *толкает пластины друг к другу*.



a)



б)

Рис. 12.1. (a) Вакуумные флуктуации электромагнитного поля. (б) Вакуумные флуктуации между двумя металлическими пластинами и они же вне пластин

Подумайте о том, насколько это странно. Вы помещаете две плоские, самые обыкновенные, незаряжённые металлические пластины в *пустую* область пространства, друг против друга. Когда их масса мала, гравитационное притяжение между ними настолько мало, что может быть полностью проигнорировано. Поскольку вокруг нет ничего другого, вы естественно решите, что пластины останутся неподвижными. Но расчёты Казимира показали, что произойдёт не это. Казимир пришёл к заключению,

что призрачная хватка квантовых вакуумных флуктуаций будет мягко вынуждать пластины к встречному движению.

Когда Казимир впервые объявил об этом теоретическом результате, для проверки его предсказания не существовало достаточно чувствительного оборудования. Однако в течение последующего десятилетия другой датский физик Маркус Спаарней оказался в состоянии провести первые простейшие эксперименты по проверке *силы Казимира*, и с тех пор проводились всё более точные эксперименты. Например, в 1997 г. Стив Ламоро, тогда работавший в университете Вашингтона, подтвердил предсказания Казимира с точностью 5%.^{156} (Для пластин, имеющих размер примерно с игральную карту и расположенных на расстоянии одной десятитысячной сантиметра друг от друга, сила между ними оказалась примерно равной весу одной капли росы; это показывает, насколько сложно измерить силу Казимира.) Теперь мало кто сомневается, что интуитивное представление о пустом пространстве как о статической, спокойной, лишённой событий арене совершенно не имеет оснований. Из-за квантовой неопределённости пустое пространство переполнено квантовой активностью.

Это заставило учёных значительную часть XX в. разрабатывать математику для описания такой квантовой активности как электромагнитных, так и сильных и слабых ядерных сил. Усилия даром не пропали: расчёты с использованием этой математической схемы согласуются с экспериментальными результатами с беспрецедентной точностью (например, расчёты влияния вакуумных флуктуаций на магнитные свойства электронов согласуются с экспериментальными результатами с точностью до одной миллиардной).^{157}

Однако несмотря на все эти успехи в течение многих десятилетий физики понимали, что квантовые флуктуации приводят к большим трудностям в законах физики.

Давайте посмотрим, почему.

Проблемы с квантовыми флуктуациями^{158}

До настоящего времени мы обсуждали только квантовые флуктуации полей, которые существуют *внутри* пространства. А как насчёт квантовых флуктуаций самого пространства? Хотя это может звучать странно, на самом деле это просто другой пример флуктуаций квантовых полей, который, однако, оказывается особенно трудным. В общей теории

относительности Эйнштейн установил, что гравитация может быть описана как деформация и искривление ткани пространства; он показал, что гравитационные поля проявляются через форму геометрии пространства (или, в более общем виде, пространства-времени). Поэтому, точно так, как и любое другое поле, гравитационное поле подвергается квантовым флуктуациям: из принципа неопределённости следует, что на очень маленьких масштабах расстояний гравитационное поле непрерывно хаотически меняется. А поскольку гравитационное поле есть синоним формы пространства, такие квантовые флуктуации означают, что хаотично колеблется форма пространства. Снова, как и во всех других примерах квантовой неопределённости, на масштабах наших повседневных расстояний флуктуации слишком малы, чтобы ощущаться непосредственно, и окружающая среда выглядит гладкой, спокойной и предсказуемой. Но чем меньше масштаб наблюдения, тем больше неопределённость и тем более неистовыми становятся квантовые флуктуации.

Это проиллюстрировано на рис. 12.2, на котором мы показываем ткань пространства с всё большим увеличением, чтобы обнаружить её структуру при всё более мелких расстояниях. На самом нижнем уровне на рисунке показаны квантовые возмущения пространства на привычных масштабах и, как вы можете видеть, тут нечего смотреть — неровности настолько малы, что ненаблюдаемы, так что пространство выглядит невозмутимым и плоским. Но когда мы проникаем глубже, последовательно усиливая увеличение, мы видим, что неровности пространства становятся всё более заметными. На самом верхнем уровне, на рисунке, который показывает ткань пространства на масштабах меньше планковской длины — миллионной от миллиардной от миллиардной от миллиардной доли сантиметра (10^{-33} см) — пространство становится бурлящим, кипящим котлом бешеных флуктуаций. Как поясняет иллюстрация, обычные понятия влево/вправо, назад/вперёд и вверх/вниз становятся настолько перемешанными ультрамикроскопической суматохой, что они теряют всякий смысл. Даже обычное понятие до/после, которое мы иллюстрировали последовательными сечениями блока пространства-времени, из-за квантовых флуктуаций становится бессмысленным на временных масштабах меньше планковского времени, около десятой от миллионной от триллионной от триллионной от триллионной доли секунды (10^{-43} с — планковское время, равное времени, которое необходимо свету, чтобы пройти планковскую длину). Подобно размытой

фотографии, интенсивные скачки на рис. 12.2 делают невозможным однозначно разделить один временной срез от другого, когда интервал времени между ними становится короче планковского времени. В итоге, на масштабах более мелких, чем планковская длина и планковское время, квантовая неопределённость делает ткань космоса настолько перекрученной и искажённой, что обычные концепции пространства и времени более неприменимы.

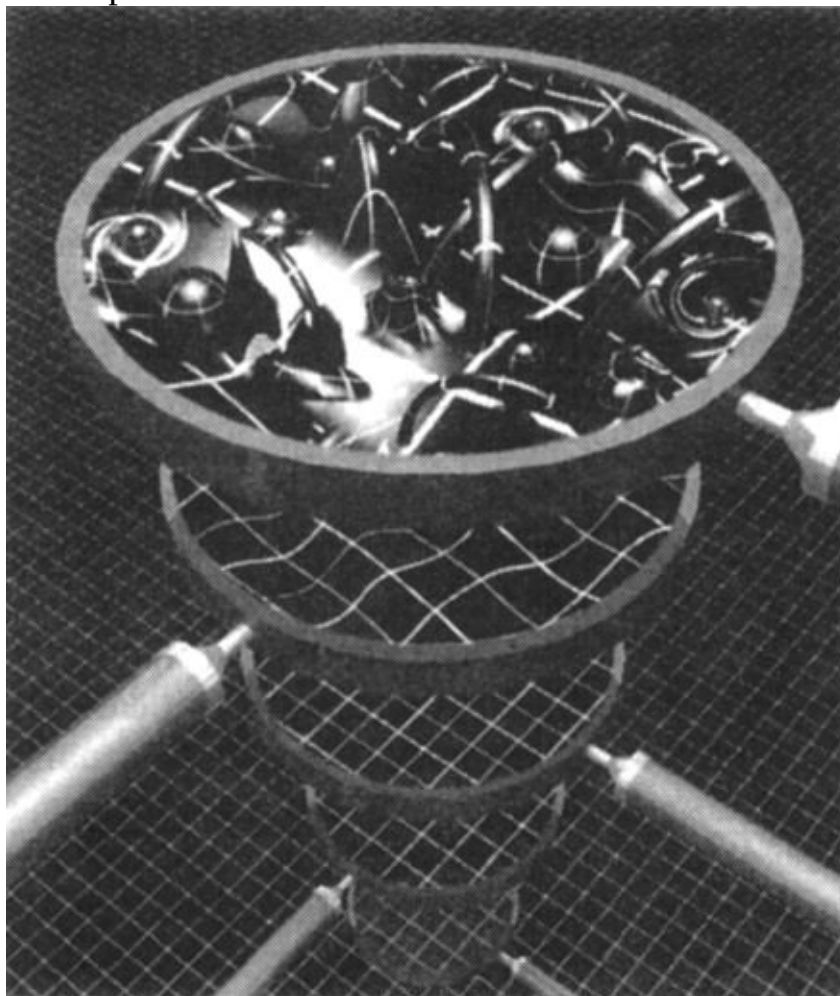


Рис. 12.2. Последовательное усиление увеличения при исследовании пространства обнаруживает, что при масштабах ниже планковской длины пространство становится неузнаваемо бурным и запутанным вследствие квантовых флуктуаций (здесь представлены воображаемые увеличительные стёкла, каждое из которых даёт увеличение где-то между 10 и 100 млн раз)

Урок, который можно извлечь из рис. 12.2, относится к разряду тех, с

которыми мы уже знакомы: концепции и заключения, осмысленные на одном масштабе, могут быть неприменимыми на всех масштабах. Это ключевой принцип в физике, да и встречаемся мы с ним постоянно, даже в куда более прозаических контекстах. Возьмём стакан воды. Описание воды как гладкой, однородной жидкости и полезно, и применимо на повседневных масштабах, но это является приближением, которое нарушается, если мы изучаем воду с субмикроскопической точностью. На крошечных масштабах гладкий образ уступает место совершенно другой системе, представляющей собой разделённые большими промежутками молекулы и атомы. Аналогично, рис. 12.2 показывает, что эйнштейновская концепция гладкого, плавно искривлённого геометрического пространства и времени, хотя и является мощной и точной для описания Вселенной на больших масштабах, но рушится, когда мы анализируем Вселенную на экстремально коротких расстояниях и малых временных масштабах. Физики считают, что, как и в случае с водой, образ гладкого пространства и времени является приближением, которое уступает место другим, более фундаментальным представлениям, когда рассматриваются ультрамикроскопические масштабы. Что это за рамки — что представляют собой «молекулы» и «атомы» пространства и времени, — этот вопрос в настоящее время очень энергично изучается. На него ещё предстоит дать ответ.

Однако из рис. 12.2 уже вполне ясно, что на самых мелких масштабах гладкий характер пространства и времени, который представляет нам общая теория относительности, вступает в борьбу с неистовыми флуктуациями квантовой механики. Основной принцип общей теории относительности Эйнштейна, что пространство и время имеют плавно искривлённую геометрическую форму, сталкивается с основным принципом квантовой механики, с принципом неопределённости, который подразумевает дикую, буйную, спутанную среду на мельчайших масштабах. Глубокий конфликт между центральными идеями общей теории относительности и квантовой механики сделал объединение двух теорий одной из самых трудных проблем, с которыми физики сталкивались в течение последних восьмидесяти лет.

Нужно ли это?

На практике несовместимость между общей теорией относительности и квантовой механикой проявляет себя весьма специфическим образом.

Если вы используете комбинированные уравнения из общей теории относительности и квантовой механики, они почти всегда приводят к одному ответу: бесконечности. И в этом проблема. Это бессмыслица. Экспериментаторы никогда не измеряют бесконечное количество чего-либо. Стрелки на циферблатах никогда не поворачиваются на бесконечное число оборотов. Линейкой никогда не дотянуться до бесконечности. Калькулятор никогда не покажет бесконечность. Почти всегда бесконечный ответ лишён смысла. Всё это говорит нам, что уравнения общей теории относительности и квантовой механики при попытке их объединения терпят крах.

Отметим, что это совершенно не похоже на трение между *специальной* теорией относительности и квантовой механикой, которое возникало в обсуждении квантовой нелокальности в главе 4. Там мы выяснили, что согласование принципов специальной теории относительности (особенно симметрии между всеми наблюдателями, движущимися с постоянной скоростью) с поведением запутанных частиц требует более полного понимания проблемы квантовых измерений, чем было до этого (см. раздел «Запутанность и специальная теория относительности: альтернативный подход» в главе 4). Но эта не решённая до конца проблема не приводит к математической несостоятельности или к уравнениям, которые дают бессмысленные ответы. Наоборот, использование объединённых уравнений специальной теории относительности и квантовой механики приводит к самым точным в истории науки проверенным предсказаниям. Трение между специальной теорией относительности и квантовой механикой указывает на область, в которой требуются дальнейшие теоретические изыскания, но они едва ли влияют на предсказательную силу комбинированной теории. Однако совсем не так спокойно обстоит дело со взрывоопасным союзом между общей теорией относительности и квантовой механикой, в котором теряется вся предсказательная сила.

Тем не менее вы можете спросить, имеет ли несовместимость между общей теорией относительности и квантовой механикой реальное значение. Безусловно, объединённые уравнения могут приводить к бессмыслице, но когда вообще вам реально может понадобиться использовать их вместе? Годы астрономических наблюдений показали, что общая теория относительности описывает макромир звёзд, галактик и даже весь расширяющийся космос с впечатляющей точностью; десятилетия экспериментов подтвердили, что квантовая механика делает то же самое для микромира молекул, атомов и субатомных частиц. Поскольку каждая теория чудесно работает в своей собственной области, зачем беспокоиться

об их объединении? Почему бы не держать их отдельно? Почему не использовать общую теорию относительности для больших и массивных объектов, квантовую механику для мелких и лёгких, и прославлять впечатляющие достижения человечества в успешном понимании такого широкого круга физических явлений?

На самом деле, это *есть* как раз то, что и делало большинство физиков с первых десятилетий XX в., и никто не отрицает, что это, несомненно, был плодотворный подход. Прогресс науки, достигнутый в этих непересекающихся областях, впечатляет. Тем не менее есть причины, почему антагонизм между общей теорией относительности и квантовой механикой должен быть устранён. Таких причин две.

Во-первых, чисто интуитивно, трудно поверить, что самое глубокое понимание Вселенной достигается в противоестественном союзе двух мощных теоретических схем, которые взаимно несовместимы. Как если бы Вселенная была снабжена пунктирными линиями, разделяющими вещи на те, которые описываются квантовой механикой, и те, которые описываются общей теорией относительности. Разделение Вселенной на две обособленные реальности кажется и искусственным, и неуклюжим. Для многих уже отсюда ясно, что должна существовать более глубокая, объединённая истина, которая преодолевает пропасть между общей теорией относительности и квантовой механикой и которая *применима ко всему*. У нас есть одна Вселенная, и поэтому многие совершенно уверены, что мы должны иметь одну теорию.

Во-вторых, хотя большинство объектов действительно являются либо большими и тяжёлыми, либо маленькими и лёгкими и, следовательно, в практическом смысле могут быть описаны с использованием общей теории относительности *или* квантовой механики, это не верно для всех объектов. Чёрные дыры — хороший пример этому. В соответствии с общей теорией относительности вся материя, составляющая чёрную дыру, впрессована в единственную крохотную точку в центре чёрной дыры.^{[\[159\]](#)} Это делает центр чёрной дыры как чудовищно массивным, так и немыслимо маленьким, а потому он оказывается с обеих сторон предлагаемого деления: общую теорию относительности необходимо использовать, так как большая масса создаёт мощное гравитационное поле, и в то же время надо использовать квантовую механику, так как вся масса втиснута в микроскопический размер. Но в комбинации уравнения рушатся, так что никто не может определить, что происходит прямо в центре чёрной дыры.

Это хороший пример, но если вы на самом деле скептик, вы можете ещё поинтересоваться, является ли он чем-то таким, что должно вызывать у

кого-то бессонницу. Поскольку мы не можем заглянуть внутрь чёрной дыры, пока мы туда не прыгнем, и, более того, если мы туда всё же прыгнем, то мы не сможем сообщить о наших наблюдениях назад во внешний мир, наше неполное понимание внутренней области чёрной дыры может нас беспокоить, но не слишком. На физиков, однако, существование области, в которой отказывают известные законы физики, — не важно, насколько таинственной может казаться эта область, — действует как красная тряпка на быка. Если известные законы физики дают сбой хоть в каких-то условиях, это ясный сигнал, что мы не достигли наиболее глубокого возможного понимания природы. При всём при том, Вселенная работает; настолько, насколько мы можем судить, Вселенная не разваливается на куски. Правильная теория Вселенной должна по меньшей мере удовлетворять тому же стандарту.

Да, это, конечно, выглядит разумным. Но, на мой взгляд, срочная необходимость разрешения конфликта между общей теорией относительности и квантовой механикой обнаруживается только в следующем примере. Посмотрим снова на рис. 10.6. Как вы можете видеть, мы сделали важные шаги в построении состоятельной и обладающей предсказательной силой истории космической эволюции, но картина осталась неполной из-за туманного пятна вблизи рождения Вселенной. А в дымке тех ранних моментов лежит прорыв в самые манящие тайны: в происхождение и фундаментальную природу пространства и времени. Так что нам мешает проникнуть в туман? Дело в конфликте между общей теорией относительности и квантовой механикой. Антагонизм между законами большого и законами малого является причиной невозможности проникнуть в туман, и мы всё ещё не имеем понимания того, что происходило в самом начале Вселенной.

Чтобы понять, почему, представьте, как мы делали в главе 10, прокрутку плёнки с расширяющимся космосом в обратном направлении, назад к Большому взрыву. При прокрутке в обратном направлении всё, что сейчас разносится в стороны, будет собираться вместе, и по мере прокрутки плёнки всё дальше назад Вселенная становится всё меньше, горячее и плотнее. Когда мы приблизимся к самому моменту времени «нуль», вся наблюдаемая Вселенная сожмётся до размеров Солнца, затем спрессуется до размеров Земли, затем до размеров шара для боулинга, горошины, песчинки — Вселенная становится всё меньше и меньше по мере того как плёнка перематывается по направлению к начальным кадрам. Наконец, наступит момент, когда вся известная Вселенная будет иметь размер, близкий к планковской длине, — миллионной от миллиардной от

миллиардной от миллиардной доли сантиметра, — при которой общая теория относительности и квантовая механика сталкиваются лбами. В этот момент вся масса и энергия, соответствующая рождению наблюдаемой Вселенной, содержится в кусочке, который в сто миллиардов миллиардов раз меньше размера атома. ^[160]

Таким образом, точно так же, как центр чёрной дыры, ранняя Вселенная попадает на обе стороны водораздела: гигантская плотность ранней Вселенной требует использования общей теории относительности. Крохотные размеры ранней Вселенной требуют использования квантовой механики. Но, ещё раз, вместе эти законы отказываются работать. Проектор «зажёвывает» плёнку, в ней прогорает дырка, и мы не можем подобраться к самым ранним моментам Вселенной. Вследствие конфликта между общей теорией относительности и квантовой механикой мы остаёмся неосведомлёнными о том, что происходило в начале, и возвращаемся к изображению туманного пятна на рис. 10.6.

Если мы надеемся когда-нибудь понять истоки Вселенной — один из глубочайших вопросов во всей науке, — конфликт между общей теорией относительности и квантовой механикой должен быть разрешён. Мы обязаны урегулировать конфликт между законами большого и законами малого и соединить их в отдельную гармоничную теорию.

Невероятный путь к решению ^[74]

Как показали работы Ньютона и Эйнштейна, научные прорывы иногда обязаны гению отдельных учёных. Но это редкость. Гораздо чаще великие прорывы являются результатом коллективных усилий многих учёных, каждый из которых, основываясь на достижениях других, доводит до завершения то, что ни один человек не смог бы достичь в одиночестве. Один учёный может предложить идею, она заставит коллег задуматься, это приведёт к наблюдениям, которые обнаружат неожиданные связи, что послужит толчком к важному продвижению вперёд, что запустит новый цикл исследований. Обширные познания, технические возможности, гибкость мышления, открытость к нестандартным связям, погружение в свободный поток мыслей всего мира, тяжёлая работа и существенная доля удачи являются важнейшими составляющими научного открытия. В последнее время, возможно, не было прорыва, который иллюстрировал бы всё это лучше, чем разработка теории суперструн.

Теория суперструн представляет собой подход, который, как уверены

многие учёные, может успешно объединить общую теорию относительности и квантовую механику. И, как мы увидим, есть основания надеяться даже на большее. Хотя всё ещё предстоит очень много работы, теория суперструн вполне может оказаться полностью унифицированной теорией всех сил и всей материи, теорией, которая реализует мечту Эйнштейна, и даже больше — теорией, как надеюсь я и многие другие, освещающей начало пути, который однажды приведёт нас к самым глубоким законам Вселенной. Правда, однако, состоит в том, что теория суперструн не замышлялась как специальный хитроумный способ достичь этих благородных и долгосрочных целей. Напротив, история теории суперструн полна случайных открытий, фальстартов, упущенных возможностей и почти разрушенных карьер. Это также, в точном смысле, история открытия правильного решения неправильной проблемы.

В 1968 г. молодой постдок Габриэле Венециано, работая в ЦЕРНе, был одним из многих физиков, пытавшихся понять сильное ядерное взаимодействие через изучение результатов высокоэнергетических столкновений частиц, производимых на ускорителях по всему миру. После месяцев анализа закономерностей экспериментальных данных Венециано обнаружил удивительную и неожиданную связь с малоизвестной областью математики. Он обнаружил, что формула, открытая две сотни лет назад знаменитым математиком Леонардом Эйлером (бета-функция Эйлера), кажется, точно описывает данные по сильным ядерным взаимодействиям. Хотя это не звучало уж очень необычно — физики-теоретики всё время имеют дело с загадочными формулами, — это был замечательный случай, когда телега много миль прокатилась впереди лошади. Чаще физики сначала развивают интуитивную, мысленную картину, понимая в общих чертах физические принципы, лежащие в основе всего, что бы они ни изучали, и только затем ищут уравнения, необходимые, чтобы облечь свою интуицию в строгую математику. Венециано, напротив, начал сразу с уравнений; его талант проявился в способности распознать необычные закономерности в экспериментальных данных и установить неожиданную связь с формулой, разработанной столетиями ранее из чисто математического интереса.

Но хотя Венециано имел в руках формулу, он не мог объяснить, почему она работает. Ему не хватало физической картины, из которой было бы понятно, какое отношение бета-функция Эйлера может иметь к частицам, влияющим друг на друга благодаря сильному ядерному взаимодействию. В течение двух лет ситуация совершенно изменилась. В 1970 г. в статьях Леонарда Сасскинда из Стэнфорда, Холгера Нильсена из

Института Нильса Бора и Йоихиро Намбу из университета Чикаго было найдено физическое обоснование открытия Венециано. Эти физики показали, что если сильное взаимодействие между двумя частицами происходит так, как будто они связаны крошечной, чрезвычайно тонкой нитью, похожей на резиновую, тогда квантовые процессы, над которыми мучительно размышляли Венециано и другие, будут математически описываться с использованием формулы Эйлера. Маленькие эластичные нити были названы *струнами*, и в этот момент, когда лошадь, наконец, поставили перед телегой, произошло официальное рождение теории струн.

Но придержите шампанское. Для тех, кто был вовлечён в эти исследования, было большим удовлетворением понять физические основы, лежащие за догадкой Венециано, поскольку это наводило на мысль, что физики находились на верном пути к пониманию сильного ядерного взаимодействия. Но открытие не было встречено с всеобщим энтузиазмом; далеко не было. Очень далеко. Фактически, статья Сасскинда была возвращена журналом, в который он её послал, с комментарием, что работа почти не представляет интереса. Эту оценку Сасскинд вспоминал так: «Я был ошеломлён, я был выбит из колеи, я впал в такую депрессию, что пошёл домой и напился»^{161}. В конечном счёте его статья и все другие работы, которые вводили концепцию струн, были опубликованы, но это произошло незадолго до того, как теория претерпела две ещё более сокрушительные неудачи. Тщательное изучение более точных данных по сильному ядерному взаимодействию, полученных в начале 1970-х гг., показало, что струнная схема не годится для точного описания новых результатов. Более того, новый подход, названный *квантовой хромодинамикой*, который твёрдо основывался на традиционных понятиях частиц и полей (без всяких струн), смог убедительно описать все экспериментальные данные. Таким образом, около 1974 г. теория струн получила один-два нокаутирующих удара. Или так казалось.

Джон Шварц был одним из первых струнных энтузиастов. Однажды он сказал мне, что с самого начала имел определённое ощущение, что теория глубока и важна. Шварц потратил несколько лет, анализируя различные математические стороны теории струн; среди прочего это привело к открытию теории суперструн — как мы увидим, важному уточнению исходной струнной идеи. Но с восхождением квантовой хромодинамики и неудачей струнной схемы для описания сильного взаимодействия основания для продолжения работы по теории струн начали рассеиваться. Тем не менее имелось одно любопытное несоответствие между теорией струн и сильным ядерным

взаимодействием, которое не давало покоя Шварцу, и он обнаружил, что просто не может это так оставить. Квантово-механические уравнения теории струн предсказывали, что при высокоэнергетических столкновениях, имеющих место в ускорителях, должны были в изобилии рождаться особые, довольно необычные частицы. Частица должна была иметь нулевую массу, как фотон, но теория струн предсказывала, что она должна была иметь *спин 2*, что означает, грубо говоря, что она вращается в два раза быстрее фотона. Никто из экспериментаторов никогда не находил такую частицу, так что она оказалась среди ложных предсказаний, сделанных теорией струн.

Шварц и его соавтор Джоэл Шерк были озадачены этой отсутствующей частицей, пока в блестящем интеллектуальном прорыве они не установили связь с совершенно другой проблемой. Хотя никто не мог объединить общую теорию относительности и квантовую механику, физики определили некоторые свойства, которые должны возникать в любом таком успешном союзе. И, как отмечено в главе 9, одно из свойств, которые они нашли, состоит в том, что точно так же, как электромагнитные силы микроскопически переносятся фотонами, гравитационные силы должны микроскопически переноситься другим классом частиц, гравитонами (самыми элементарными, квантовыми кусочками гравитации). Хотя гравитоны ещё предстоит найти экспериментально, любой теоретический анализ приводит к тому, что гравитоны должны иметь два свойства: они должны быть безмассовыми и иметь *спин 2*. Для Шварца и Шерка это было как удар в колокол — это были в точности свойства непослушной частицы, предсказанной теорией струн, — и это заставило их предпринять смелый шаг, который превратил неудачу теории струн в яркий успех.

Они предположили, что теория струн не должна рассматриваться как квантово-механическая теория сильных ядерных взаимодействий. Они объясняли, что хотя теория была открыта в попытке понять сильные взаимодействия, на самом деле она является решением другой проблемы. На самом деле она является первой квантово-механической теорией *гравитационного* взаимодействия. Они заявили, что безмассовая частица со спином 2, предсказанная теорией струн, является гравитоном, и что уравнения теории струн с необходимостью включают квантово-механическое описание гравитации.

Шварц и Шерк опубликовали свои предположения в 1974 г. и ожидали бурной реакции от физического сообщества. Но их труд был проигнорирован. Ретроспективно, не трудно понять, почему. Некоторым

казалось, что концепция струн стала теорией в поиске приложений. После того как попытки использовать теорию струн для объяснения сильных ядерных взаимодействий провалились, казалось, что её сторонники не смогли признать поражения и вместо этого из кожи вон лезли, стараясь найти применение теории где-то в другом месте. Дров в огонь подкинуло то, что стало ясно, как Шварцу и Шерку нужно радикально изменить размер струн в своей теории, чтобы силы, переносимые этим кандидатом в гравитоны, соответствовали обычной, известной силе гравитации. Поскольку гравитация является экстремально слабой силой^[75] и поскольку оказалось, что чем длиннее струна, тем сильнее переносимое взаимодействие, Шварц и Шерк обнаружили, что струны должны быть предельно малы, чтобы переносить такую слабую силу, как гравитация; их размер должен быть порядка планковской длины, в сотню миллиардов миллиардов раз меньше, чем сначала представлялось. Настолько малы, как отмечали с усмешкой сомневающиеся, что не существует оборудования, которое могло бы их увидеть, а это означает, что теория не может быть проверена экспериментально.^{162}

По контрасту с этим, 1970-е гг. ознаменовались многочисленными успехами в более обычных, не основанных на струнах, теориях, формулируемых с использованием точечных частиц и полей. Головы и руки теоретиков и экспериментаторов были полны конкретными идеями исследований и заняты теоретическими предсказаниями, требующими проверки. Зачем заниматься спекулятивной теорией струн, когда имеется так много интересной работы внутри испытанных схем? Во многом из-за таких настроений, хотя физики и держали в потаённых уголках сознания мысль, что проблема соединения гравитации и квантовой механики остаётся нерешённой с использованием обычных методов, теория струн не была проблемой, привлекающей внимание. Почти каждый признавал, что это важная проблема и однажды к ней придётся обратиться, но с той огромной работой, которую ещё остаётся сделать в области негравитационных взаимодействий, проблема квантования гравитации задвигалась в дальний угол. И, наконец, в период с середины до конца 1970-х гг. теория струн была далеко не полностью разработана. То, что она содержала кандидата на гравитон, было успехом, но всё ещё имелось большое число концептуальных и технических проблем. Казалось вполне правдоподобным, что теория не сможет решить некоторые из этих проблем, так что работа в теории струн означала значительный риск. В течение нескольких лет теория могла погибнуть.

Шварц остался твёрд. Он был уверен, что открытие теории струн, первого правдоподобного подхода к описанию гравитации на языке квантовой механики, является крупным прорывом. Если никто не хочет его слышать, прекрасно. Он будет прилагать усилия в прежнем направлении и развивать теорию, так что когда люди будут готовы уделить этой теории внимание, она будет продвинута намного дальше. Его решение оказалось пророческим.

В конце 1970-х — начале 1980-х гг. Шварц объединился с Майклом Грином, работавшим тогда в Колледже королевы Марии в Лондоне, и они разрешили некоторые технические трудности, имевшиеся в теории струн. Первой среди них была проблема *аномалий*. Детали не существенны, но, грубо говоря, аномалия является разрушительным квантовым эффектом, который очень плох для теории, так как приводит к нарушению некоторых священных принципов, например сохранения энергии. Чтобы быть жизнеспособной, теория должна быть свободна от всех аномалий. Первоначальные исследования обнаружили, что теория струн страдает от нашествия аномалий, и это было одной из главных технических причин, по которым она не могла вызвать много энтузиазма. Аномалии означали, что хотя теория струн выглядит способной дать квантовую теорию гравитации, поскольку она содержит гравитоны, но более пристальная проверка показывает, что теория страдает от своей собственной математической несостоятельности.

Шварц понял, однако, что ситуация является не вполне ясной. Имелся шанс — хотя и довольно призрачный, — что полный расчёт покажет: различные квантовые вклады в аномалии, от которых страдает теория струн, при корректном объединении взаимно уничтожают друг друга. Вместе с Грином Шварц предпринял тяжёлую работу по расчёту этих аномалий и к лету 1984 г. они достигли успеха. Одной бурной ночью в Физическом центре Аспена в Колорадо они завершили одно из наиболее важных вычислений в этой области — расчёт, показывающий, что все потенциальные аномалии *действительно* были уничтожены одна другой, способом, который кажется почти сверхъестественным. Они обнаружили, что теория струн свободна от аномалий и потому не страдает от математической несостоятельности. Теория струн, как они убедительно продемонстрировали, оказалась квантово-механически жизнеспособной.

На этот раз физики прислушались. Это была середина 1980-х гг., и климат в физике ощутимо изменился. Многие из существенных особенностей трёх негравитационных взаимодействий были исследованы теоретически и подтверждены экспериментально. Хотя важные детали

оставались непонятыми — а некоторые не поняты до сих пор, — сообщество было готово энергично взяться за следующую большую проблему: соединение общей теории относительности и квантовой механики. Тогда из малоизвестного угла физики Грин и Шварц неожиданно вырвались на сцену с определённым, математически последовательным и эстетически привлекательным предложением того, что надо делать. Едва ли не в течение ночи число исследователей, работавших в теории струн, возросло с двух человек до более чем тысячи. Произошла первая струнная революция.

Первая революция

Я поступил в аспирантуру в Оксфордском университете в конце 1984 г. и в течение нескольких месяцев коридоры гудели от разговоров о революции в физике. Поскольку Интернету ещё только предстояло получить широкое распространение, доминирующим каналом обмена информацией были слухи, и каждый день они доносили вести о новых прорывах. Исследователи повсюду высказывались в том смысле, что атмосфера была заряжена так, как не бывала со времён первых дней квантовой механики, и шли серьёзные разговоры о том, что конец теоретической физики находится в пределах достижимого.

Теория струн была новой почти для каждого, так что в эти ранние дни её детали не были общеизвестны. Нам особенно повезло в Оксфорде: Майкл Грин в то время посетил его с лекцией по теории струн, так что многие из нас ознакомились с основными идеями теории и её существенными утверждениями. И это были впечатляющие утверждения. В двух словах, вот что гласила теория:

Возьмите любое тело — кусок льда, каменную глыбу, железную плиту — и представьте, что его делят пополам, затем один из кусков ещё пополам и т. д.; представьте продолжающееся деление материала на всё более мелкие куски. Примерно 2500 лет назад древние греки сформулировали проблему определения мельчайшей неделимой составляющей, которая являлась бы конечным продуктом такой процедуры. В наше время мы узнали, что рано или поздно вы придёте к атомам, но атомы не являются ответом на вопрос греков, поскольку они могут быть разделены на более мелкие составляющие. Атомы могут быть расщеплены. Мы узнали, что они состоят из электронов, которые роятся вокруг центрального ядра, а оно, в свою очередь, состоит из ещё более мелких частиц — протонов и

нейтронов. А в конце 1960-х гг. эксперименты на Стэнфордском линейном ускорителе показали, что даже сами нейтроны и протоны построены из более фундаментальных составляющих: каждый протон и каждый нейтрон состоит из трёх частиц, называемых кварками, как было отмечено в главе 9 и как проиллюстрировано на рис. 12.3а.

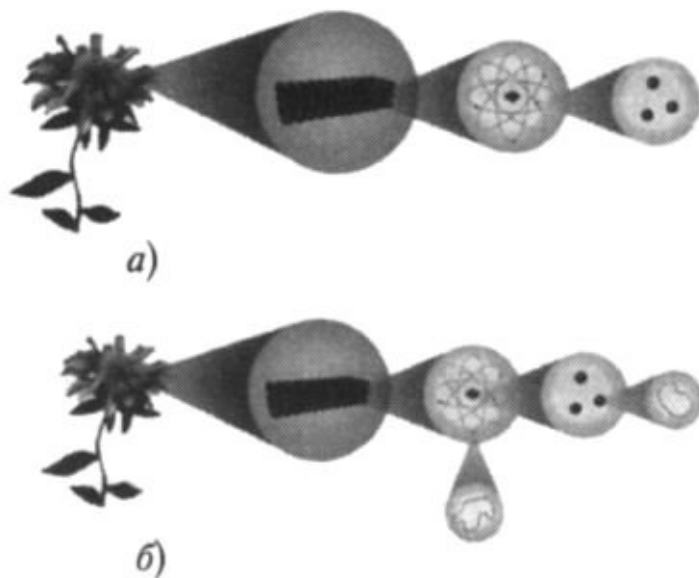


Рис. 12.3. (а) Обычная теория основана на электронах и кварках как базовых составляющих материи. (б) Теория струн предполагает, что каждая частица на самом деле является вибрирующей струной

Обычная теория, поддерживаемая современнейшими экспериментами, представляет электроны и кварки как точки без какой-либо пространственной протяжённости; в этом смысле, следовательно, они знаменуют конец процедуры деления — последнюю фигурку природной матрёшки, которая может быть найдена в микроскопической структуре материи. Именно тут появляется теория струн. Теория струн бросает вызов обычной картине, предполагая, что электроны и кварки *не* являются частицами нулевого размера. Обычная модель точечно-подобной частицы в соответствии с теорией струн является приближением к более тонкому представлению, в котором каждая частица на самом деле является крохотной вибрирующей нитью энергии, названной струной, как вы можете видеть на рис. 12.3б. Эти нити вибрирующей энергии представляются не имеющими толщины, только длину, так что струны являются одномерными сущностями. Кроме того, поскольку струны столь

малы, в несколько сотен миллиардов миллиардов раз меньше атомного ядра (10^{-33} см), они кажутся точками даже тогда, когда исследуются на наших самых совершенных ускорителях.

Поскольку наше понимание теории струн далеко от полноты, никто не может сказать с уверенностью, заканчивается ли история на этом, — если теория корректна, являются ли струны действительно самой маленькой матрёшкой, или они сами могут быть составлены из ещё более мелких ингредиентов. Мы вернёмся к этой проблеме, но пока мы будем следовать историческому развитию предмета и представим, что струны — это действительно предел всего; мы представим, что струны являются самыми элементарными кирпичиками во Вселенной.

Теория струн и объединение

В этом, вкратце, состоит суть теории струн, но чтобы передать мощь нового подхода, я должен немного более полно описать обычную физику частиц. За последние сто лет физики прощупывали, расплющивали и распыляли материю в поиске элементарных составляющих Вселенной. И, действительно, они нашли, что почти во всём, с чем кто-либо когда-либо сталкивался, фундаментальными ингредиентами являются только что упомянутые электроны и кварки — более точно, как говорилось в главе 9, электроны и два вида кварков, *u*-кварк и *d*-кварк, которые отличаются массой и электрическим зарядом. Но эксперименты также показали, что Вселенная имеет другие, более экзотические типы частиц, которые не встречаются в обычной материи. В дополнение к *u*-кварку и *d*-кварку эксперименты идентифицировали четыре других вида кварков (*s*-кварки, *s*-кварки, *b*-кварки и *t*-кварки) и два других вида частиц, которые очень похожи на электроны, только тяжелее (мюоны и тау-частицы). Возможно, эти частицы рождались в изобилии сразу после Большого взрыва, но сегодня они возникают только как эфемерные осколки от высокоэнергетических столкновений между более привычными частицами. Наконец, экспериментаторы также открыли три вида призрачных частиц, называемых нейтрино (электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино), которые могут проходить через триллионы километров свинца так же легко, как мы проходим сквозь воздух. Эти частицы — электрон и два его более тяжёлых родственника, шесть видов кварков и три вида нейтрино — являются ответом сегодняшнего специалиста по физике частиц на вопрос древних греков о том, из чего состоит материя. [\[163\]](#)

Список видов частиц может быть организован в три «семьи», или «поколения», частиц, как показано в табл. 12.1. Каждое поколение имеет два кварка, одно нейтрино и одну электроподобную частицу; единственная разница между соответствующими частицами в поколениях заключается в том, что их массы возрастают в каждом последующем поколении. Разделение на поколения определённо наводит на мысль о лежащей в основании системе, но от нагромождения частиц голова легко может пойти кругом (или, хуже того, вы просто заснёте). Однако держитесь крепче, поскольку одно из самых прекрасных свойств теории струн заключается в том, что она способна приручить всю эту видимую сложность.

Таблица 12.1. Три поколения фундаментальных частиц и их массы (в единицах масс протона). Известно, что величины масс нейтрино не равны нулю, но их точные величины пока ускользают от экспериментального определения

Поколение 1		Поколение 2		Поколение 3	
Частица	Масса	Частица	Масса	Частица	Масса
Электрон	0,00054	Мюон	0,11	Тау	1,9
Электронное нейтрино	$< 10^{-9}$	Мюонное нейтрино	$< 10^{-4}$	Тау-нейтрино	$< 10^{-3}$
<i>u</i> -кварк	0,0047	<i>c</i> -кварк	1,6	<i>t</i> -кварк	189
<i>d</i> -кварк	0,0074	<i>s</i> -кварк	0,16	<i>b</i> -кварк	5,2

В соответствии с теорией струн имеется только один фундаментальный ингредиент — струна, и всё богатство разновидностей частиц просто отражает различные типы колебаний струны. Это похоже на то, что происходит с более обычными струнами виолончели или скрипки. Виолончельная струна может колебаться множеством различных способов, и мы слышим каждый способ как отдельную музыкальную ноту. За счёт этого одна виолончельная струна может издавать целый набор различных звуков. Струны в теории струн ведут себя аналогично: они тоже могут вибрировать различными способами. Но вместо получения различных музыкальных тонов различные способы колебаний в теории струн соответствуют различным видам частиц. Ключевая идея заключается в том, что разные способы колебаний струны дают определённую массу,

определённый электрический заряд, определённый спин и т. д. — получается определённый список свойств, который отличает один тип частицы от другого. Колебание струны одним способом может иметь свойства электрона, в то время как струна, колеблющаяся другим способом, может иметь свойства *u*-кварка, *d*-кварка или любого другого типа частиц из табл. 12.1. Это не значит, что «электронная струна» составляет электрон, или «*u*-кварковая струна» составляет *u*-кварк, или «*d*-кварковая струна» составляет *d*-кварк. Единственный тип струны может отвечать за великое множество частиц, поскольку струна может выполнять великое множество способов колебаний.

Как вы видите, это представляет потенциально гигантский шаг в направлении унификации. Если теория струн верна, кружащий голову и утомительный список частиц в табл. 12.1 представляется репертуаром вибраций единственного базового ингредиента. Метафорически, различные ноты, которые могут быть сыграны на единственной разновидности струны, могут отвечать за все различные обнаруженные частицы. На ультрамикроскопическом уровне Вселенная будет сродни симфонии струн, вибрация которых приводит к существованию материи.

Это — восхитительно элегантная система для объяснения частиц в табл. 12.1, но, кроме того, предложенная теорией струн унификация идёт ещё дальше. В главе 9 и в нашем обсуждении выше мы говорили о том, что силы природы переносятся на квантовом уровне другими частицами, частицами — переносчиками взаимодействий, которые собраны в табл. 12.2. Теория струн отвечает за частицы — переносчики взаимодействий точно так же, как она отвечает за частицы материи. А именно, каждая частица-переносчик является струной, которая вибрирует определённым способом. Фотон является вибрацией струны одним способом, *W*-частица есть вибрация струны другим способом. И, что очень важно, как показали Шварц и Шерк в 1974 г., имеется особый способ вибрации, который имеет все свойства гравитона, так что гравитационная сила тоже включена в квантово-механическую схему теории струн. Таким образом, не только частицы материи возникают из вибрирующих струн, но также и частицы — переносчики взаимодействий, даже частица — переносчик гравитации.

Таблица 12.2. Четыре силы природы вместе со связанными с ними частицами и их массами в единицах массы протона (в действительности имеется две *W*-частицы — одна с зарядом +1 и одна с зарядом -1, — которые имеют одинаковую массу; для

простоты мы пренебрегаем этими деталями и отмечаем каждую как W -частицу)

Взаимодействие (сила) Частица — переносчик силы Масса

Сильное	Глюон	0
Электромагнитное	Фотон	0
Слабое	W ; Z	86; 97
Гравитационное	Гравитон	0

Итак, помимо обеспечения первого успешного подхода к соединению гравитации и квантовой механики, теория струн обнаруживает свою силу, обеспечивая единое описание для всей материи и всех взаимодействий. Это то утверждение, которое в середине 1980-х гг. выбило из колеи тысячи физиков; со временем они пришли в себя, и многие поменяли убеждения.

Почему работает теория струн?

До разработки теории струн путь научного прогресса был усеян неудачными попытками соединить гравитацию и квантовую механику. Так что же есть такого в теории струн, что позволило ей так сильно преуспеть? Мы описали, как Шварц и Шерк осознали, в значительной степени неожиданно для самих себя, что имеется специальный способ вибрации струны, который обладает точно такими свойствами, чтобы быть гравитоном, и, как они затем заключили, теория струн обеспечивает готовую схему для соединения двух теорий. Исторически в самом деле так и было, сила и перспективность теории струн действительно были поняты случайно; но как объяснение, почему струнный подход преуспевает там, где все другие попытки пасуют, оно оставляет желать лучшего. Рисунок 12.2 представляет конфликт между общей теорией относительности и квантовой механикой — на ультракоротких пространственных (и временных) масштабах буйство квантовой неопределённости становится настолько сильным, что гладкая геометрическая модель пространства-времени, лежащая в основе общей теории относительности, перестаёт работать — так что вопрос в следующем: как теория струн решает проблему? Как теория струн успокаивает буйные флуктуации пространства-времени на ультрамикроскопических расстояниях?

Главное новое свойство теории струн в том, что её основной ингредиент — не точечная частица (точка без размера), а объект, который

имеет пространственную протяжённость. Это различие имеет ключевое значение для успеха теории струн в соединении гравитации и квантовой механики.

Буйство, показанное на рис. 12.2, возникает в результате применения принципа неопределённости к гравитационному полю; из принципа неопределённости следует, что на всё меньших и меньших масштабах флуктуации гравитационного поля будут всё больше и больше. На таких экстремально малых масштабах расстояний мы должны описывать гравитационное поле в терминах его фундаментальных составляющих, гравитонов, примерно так, как на молекулярных масштабах мы должны описывать воду в терминах молекул H_2O . На этом языке буйное волнение гравитационного поля должно мыслиться как большое количество гравитонов, дико носящихся туда-сюда, как частицы грязи и пыли, захваченные свирепым торнадо. Теперь, если бы гравитоны были точечными частицами (как представлялось в более ранних, неудачных попытках объединения гравитации и квантовой механики), рис. 12.2 точно отражал бы их коллективное поведение: чем меньше масштаб расстояний, тем больше волнение. Но теория струн меняет этот вывод.

В теории струн каждый гравитон есть вибрирующая струна — нечто, что не является точкой, но имеет размер порядка планковской длины (10^{-33} см).^[164] А поскольку гравитоны являются мельчайшими, наиболее элементарными составляющими гравитационного поля, не имеет смысла говорить о поведении гравитационных полей в масштабах меньше планковской длины. Точно так же, как разрешение вашего телевизионного экрана ограничено размером отдельных пикселей или зёрен, разрешение гравитационного поля в теории струн ограничено размером гравитонов. Таким образом, ненулевой размер гравитонов (и чего угодно другого) в теории струн устанавливает предел, грубо говоря, на уровне планковской длины, с точностью до которого может быть разрешено гравитационное поле.

Это понимание имеет жизненно важное значение. Неконтролируемые квантовые флуктуации, проиллюстрированные на рис. 12.2, возникают только тогда, когда мы рассматриваем квантовую неопределённость на произвольно коротких масштабах расстояний — масштабах короче планковской длины. В любой теории, основанной на точечных частицах нулевого размера, такое применение принципа неопределённости оправдано и, как мы видели на рисунке, это приводит нас к диким ландшафтам за пределами достижимости общей теории относительности

Эйнштейна. Однако теория, основанная на струнах, включает встроенную защиту от отказов. В теории струн струны являются самыми мелкими составными частями, так что наше путешествие в ультрамикроскопическое подходит к концу, когда мы достигаем длины Планка — размера самих струн. На рис. 12.2 планковский масштаб представлен вторым сверху уровнем; как вы можете видеть, на таких масштабах флуктуации ткани пространства всё ещё остаются, так как гравитационное поле всё ещё подвержено квантовому дрожанию. Но эта дрожь достаточно мягкая, чтобы избежать неустранимого конфликта с общей теорией относительности. Точная математика, лежащая в основе общей теории относительности, должна быть модифицирована, чтобы включить эти квантовые колебания, но это может быть сделано, и математика остаётся осмысленной.

Таким образом, вводя ограничения, на сколько глубоко мы можем продвинуться, теория струн ограничивает величину флуктуаций гравитационного поля — и предел оказывается разумным ровно настолько, чтобы избежать катастрофического конфликта между квантовой механикой и общей теорией относительности. То есть теория струн смягчает антагонизм между двумя схемами и впервые оказывается способной соединить их.

Ткань космоса в области малого

Что это значит для ультрамикроскопической природы пространства и пространства-времени в более общем смысле? С одной стороны, это бросает вызов обычному представлению, что ткань пространства и времени непрерывна, — что вы можете всегда разделить расстояние между здесь и там или продолжительность между теперь и тогда пополам, и снова пополам, бесконечно деля пространство и время на всё более малые части. Вместо этого, когда вы доходите до планковской длины (до длины струны) и до планковского времени (до времени, которое требуется свету, чтобы преодолеть длину струны) и пытаетесь разделить пространство и время ещё, вы обнаруживаете, что это невозможно. Концепция «быть ещё меньше» теряет смысл, как только вы достигаете размера *наименьшей* составляющей космоса. Для точечных частиц нулевого размера это не приводит к ограничению, но поскольку струны имеют размер, для них это к ограничениям приводит. Если теория струн верна, обычные концепции пространства и времени, те рамки, в которые вложен весь наш повседневный опыт, просто неприменимы на масштабах меньше

планковского масштаба — масштабах самих струн.

Что касается концепций, которые должны прийти на смену, по ним всё ещё нет консенсуса. Одна возможность, которая согласуется с изложенным выше объяснением того, как теория струн соединяет квантовую механику с общей теорией относительности, заключается в том, что ткань пространства на планковском масштабе похожа на решётку или сетку, в которой «пространство» между линиями сетки находится вне границ физической реальности. Точно так же, как микроскопический муравей, гуляя по обычному кусочку ткани, будет перебираться с нити на нить, может быть, движение через пространство на ультрамикроскопических масштабах аналогично требует дискретных перескоков с одной «нити» пространства на другую. Время тоже может иметь зернистую структуру с отдельными моментами, тесно упакованными друг к другу, но не сливающимися в сплошной континуум. При таком понимании представление о всё более мелких пространственных и временных интервалах резко обрывается на планковском масштабе. Точно так же, как нет такой вещи, как американская монета достоинством меньше пенни, так и нет такой вещи, как расстояние меньше планковской длины или продолжительность короче планковского времени, если ультрамикроскопическое пространство-время имеет структуру сетки.

Другая возможность заключается в том, что пространство и время не теряют внезапно смысл на экстремально малых масштабах, а вместо этого постепенно модифицируются в иные, более фундаментальные концепции. Сокращение масштабов до величин меньше планковских будет запрещено не потому, что вы наткнётесь на фундаментальную сетку, а потому, что концепции пространства и времени продолжают в виде понятий, для которых «сокращение до меньших размеров» столь же бессмысленно, как вопрос, не является ли счастливым число девять. Это значит, мы можем представлять себе, что когда привычные макроскопические пространство и время постепенно трансформируются в их непривычные ультрамикроскопические двойники, многие из их обычных свойств — такие как длина и продолжительность — становятся неприменимыми или бессмысленными. Вы можете осмысленно говорить о температуре и вязкости жидкой воды — о концепциях, которые применимы к макроскопическим свойствам жидкости, — но когда вы спускаетесь на уровень отдельных молекул H_2O , эти концепции теряют смысл. Точно так же, вполне возможно, что, хотя вы можете делить область пространства и продолжительность времени пополам и снова пополам на повседневных

масштабах, но когда вы доходите до планковских масштабов, происходит трансформация, которая делает такое деление бессмысленным.

Многие струнные теоретики, включая меня, сильно подозревают, что что-то в духе указанных возможностей происходит на самом деле, но чтобы идти дальше, мы должны вывести эти более фундаментальные понятия, в которые трансформируются пространство и время.^[76] На сегодняшний день этот вопрос остаётся без ответа, но передовые исследования (описываемые в последней главе) предлагают некоторые возможности с далеко идущими следствиями.

Более тонкие вопросы

Из описаний, которые я давал до настоящего времени, может показаться загадочным, что некоторые физики сопротивляются очарованию теории струн. Наконец-то есть теория, которая даёт надежду на осуществление мечты Эйнштейна и даже больше; теория, которая может сгладить трение между квантовой механикой и общей теорией относительности; теория с возможностью объединения всей материи и всех сил через описание всего этого в терминах вибрирующих струн; теория, которая предлагает существование ультрамикроскопической области, в которой привычное пространство и время могут оказаться так же старомодны, как телефон с дисковым набором; короче говоря, теория, которая обещает дать нам совершенно новый уровень понимания Вселенной. Но не стоит забывать, что никто никогда не видел струну и, исключая некоторые радикальные идеи, обсуждаемые в следующей главе, скорее всего никто никогда их и не увидит, даже если теория струн верна. Струны столь малы, что прямое наблюдение их равносильно чтению текста этой страницы с расстояния 100 световых лет: это требует разрешающей силы примерно в миллиард миллиардов раз лучшей, чем позволяют наши современные технологии. Некоторые учёные громогласно заявляют, что теория, настолько удалённая от прямой эмпирической проверки, лежит в области философии или теологии, но не физики.

Я нахожу это взгляд недалёковидным или, уж по крайней мере, преждевременным. Хотя мы никогда не сможем иметь технологию, позволяющую увидеть струны непосредственно, история науки переполнена теориями, которые проверялись экспериментально косвенным образом.^{165} Теория струн не скромничает. Её цели и обещания велики. И это возбуждает, поскольку, если теория претендует на то, чтобы быть

теорией нашей Вселенной, она должна соответствовать реальному миру не только в общих чертах, как это обсуждалось до сих пор, но так же и в мельчайших деталях. Как мы теперь увидим, здесь и лежат потенциальные возможности для проверки теории.

В течение 1960-х и 1970-х гг. физики, занимающиеся частицами, сделали огромный шаг в понимании квантовой структуры материи и негравитационных сил, которые управляют её поведением. Схема, к которой они в конце концов пришли, опираясь на экспериментальные результаты и теоретическое исследования, называется *стандартной моделью* физики частиц и основывается на квантовой механике, в которой все частицы материи из табл. 12.1 и частицы взаимодействий из табл. 12.2 (исключая гравитон, поскольку стандартная модель не включает гравитацию, но включая частицу Хиггса, которая не приведена в таблицах) рассматриваются как точечные частицы. Стандартная модель способна объяснять практически все данные, получаемые на всех ускорителях, и в течение ряда лет её изобретатели заслуженно получали наивысшие почести. Несмотря на это, стандартная модель имеет существенные ограничения. Мы уже обсуждали, как она и все другие подходы, предшествовавшие теории струн, потерпели неудачу в объединении гравитации с квантовой механикой. Но имеются также и другие изъяны.

Стандартная модель не может объяснить, *почему* взаимодействия переносятся в точности частицами из списка табл. 12.2 и *почему* материя составлена в точности частицами из списка табл. 12.1. Почему имеются три поколения частиц материи и почему каждое поколение содержит именно те частицы, которые содержит? Почему не два поколения или просто одно? Почему электрон имеет в три раза больший заряд, чем *d*-кварк? Почему мюон весит в 23,4 раза больше, чем *u*-кварк, и почему *t*-кварк весит примерно в 350 000 раз больше электрона? Почему Вселенная сконструирована с использованием этих чисел, кажущихся случайными? Стандартная модель принимает частицы из табл. 12.1 и 12.2 (опять исключая гравитон) как входные данные и затем делает впечатляюще точные предсказания о том, как частицы будут взаимодействовать и влиять друг на друга. Но стандартная модель не может объяснить входные данные — частицы и их свойства, — как ваш калькулятор не может объяснить, почему вы вводили в него именно эти числа, когда пользовались им последний раз.

Загадочность свойств этих частиц не есть просто академический вопрос, почему той или иной таинственной детали случилось иметь тот или иной вид. На протяжении последнего столетия учёные поняли, что

Вселенная имеет привычные свойства, известные из повседневного опыта, только потому, что частицы табл. 12.1 и 12.2 имеют в точности те свойства, которые они имеют. Даже совсем небольшие изменения масс или электрических зарядов некоторых частиц могли бы, например, сделать их неспособными участвовать в ядерных процессах, которые дают энергию звёздам. А без звёзд Вселенная была бы совсем другой. Таким образом, детальные свойства элементарных частиц переплетены с тем, что многие рассматривают как глубочайший вопрос всей науки: *почему элементарные частицы имеют точно такие свойства, которые позволяют протекать ядерным процессам, светить звёздам, формироваться планетам вокруг звёзд и по меньшей мере на одной такой планете существовать жизни?*

Стандартная модель не может пролить никакого света на этот вопрос, поскольку свойства частиц являются частью необходимых для этой теории входных данных. Теория не сдвинется с места и не начнёт давать результаты, пока не будут заданы свойства частиц. Но теория струн иная. В теории струн свойства частиц *определяются* способами вибрации струны, так что теория обещает дать объяснение свойствам частиц.

Свойства частиц в теории струн

Чтобы понять новую объяснительную схему теории струн, нам нужно лучше почувствовать, как вибрации струн производят свойства частиц, так что рассмотрим простейшее свойство частицы, её массу.

Из формулы $E = mc^2$ мы знаем, что масса и энергия взаимозаменяемы; как доллар и евро, они являются конвертируемыми валютами (но в отличие от денежных валют, они имеют фиксированный курс обмена, заданный скоростью света, умноженной на себя, c^2). Наше выживание зависит от уравнения Эйнштейна, поскольку солнечное тепло и свет, поддерживающие жизнь, генерируются путём конвертирования 4,3 млн т материи в энергию каждую секунду; однажды ядерные реакторы на Земле смогут, подражая Солнцу, безопасно заставить работать уравнение Эйнштейна, чтобы обеспечить человечество практически неограниченными запасами энергии.

В этих примерах энергия получается из массы. Но уравнение Эйнштейна прекрасно работает и в обратном направлении — в направлении, в котором масса получается из энергии, — и это то направление, в котором теория струн использует уравнение Эйнштейна. Масса частицы в теории струн есть не что иное, как энергия её

вибрирующей струны. Например, объяснение, которое теория струн предлагает тому, почему одна частица тяжелее, чем другая, состоит в том, что струна, представляющая более тяжёлую частицу, колеблется быстрее и сильнее, чем струна, представляющая более лёгкую частицу. Более быстрые и сильные колебания означают более высокую энергию, а более высокая энергия транслируется через формулу Эйнштейна в большую массу. И наоборот, чем легче частица, тем медленнее и слабее соответствующая вибрация струны; безмассовая частица вроде фотона или гравитона соответствует струне, vibrating наиболее спокойным и мягким способом, каким только возможно. [\[77\]\[166\]](#)

Другие свойства частицы, такие как её электрический заряд и спин, кодируются более тонкими свойствами колебаний струны. По сравнению с массой эти свойства труднее описать без использования математики, но они следуют той же самой основной идее: способ колебаний является отпечатком пальца частицы; все свойства, которые мы используем, чтобы отличать одну частицу от другой, определяются способом колебаний струны, соответствующей данной частице.

В начале 1970-х гг., когда физики анализировали способы вибраций, возникающие в первой инкарнации струнной теории — *теории бозонных струн*, — чтобы определить разновидности свойств частиц, которые может предсказывать теория, они налетели на подводный камень. Каждому способу вибрации в теории бозонных струн соответствовало целочисленное значение спина: 0, 1, 2 и т. д. Это было проблемой, поскольку, хотя частицы — переносчики взаимодействий имеют значения спина этого вида, частицы материи (вроде электронов и кварков) — нет. Они имеют дробное значение спина — $1/2$. В 1971 г. Пьер Рамон из университета Флориды нашёл средство от этого недостатка — он нашёл способ так модифицировать уравнения теории бозонных струн, чтобы допустить также и способы колебаний с полуцелым спином.

Фактически, при ближайшем рассмотрении исследования Рамона, вместе с результатами Шварца и его коллеги Андре Невье и вместе с более поздними идеями Фердинандо Глиоцци, Джоэля Шерка и Дэвида Олива, открыли совершенный баланс — новую симметрию — между фигурами колебаний с различными спинами в модифицированной теории струн. Эти исследователи нашли, что новые способы вибраций возникают парами, в которых величина спина отличается на $1/2$. Для каждого способа колебаний со спином $1/2$ имеется ассоциированный способ колебаний со спином 0. Для каждого способа колебаний со спином 1 имеется ассоциированный способ колебаний со спином $1/2$ и т. д. Связь между целыми и полуцелыми

значениями спина назвали *суперсимметрией*, и вместе с этими результатами родилась *суперсимметричная теория струн*, или *теория суперструн*. Примерно десятью годами позже, когда Шварц и Грин показали, что все потенциальные аномалии, которые угрожали теории струн, уничтожили друг друга, они на самом деле работали в теории суперструн, так что революцию, вызванную их статьёй, правильнее называть *первой суперструнной революцией*. (В последующем мы часто будем ссылаться на струны и на теорию струн, но это только для краткости; мы всегда имеем в виду суперструны и теорию суперструн.)

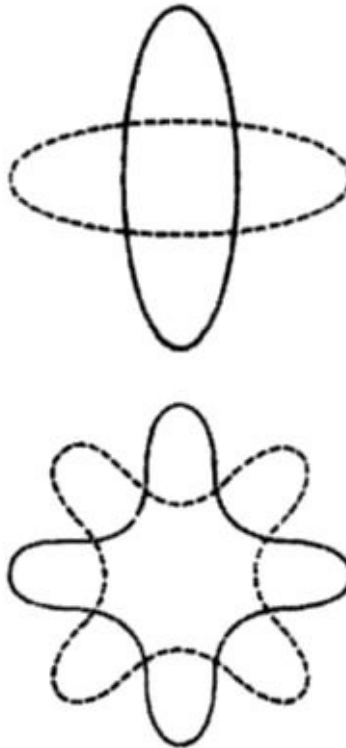
Исходя из этого, мы можем теперь сформулировать, как от общего описания теории струн перейти к детальному описанию Вселенной. Это сводится к следующему: среди способов колебаний, которым могут быть подвержены струны, должны быть такие способы, свойства которых согласуются с соответствующими свойствами известных частиц. Теория содержит моды колебаний со спином $1/2$, но она должна включать моды со спином $1/2$, *точно* соответствующие известным частицам материи, которые приведены в табл. 12.1. Теория содержит моды колебаний со спином 1, но она должна включать такие моды колебаний со спином 1, которые *точно* соответствуют известным частицам — переносчикам взаимодействий, которые приведены в табл. 12.2. Наконец, если в экспериментах на самом деле будут открыты частицы со спином 0, такие как предсказаны для полей Хиггса, теория струн должна обеспечить моды колебаний, которые *точно* соответствуют свойствам и этих частиц тоже. Короче говоря, чтобы теория струн была жизнеспособной, её моды колебаний должны давать и объяснять частицы стандартной модели.

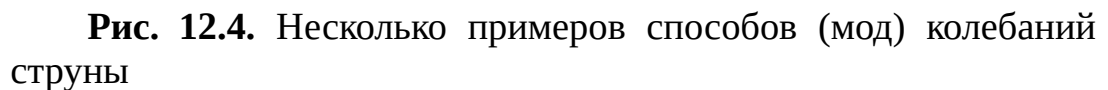
Здесь, следовательно, теории струн есть где развернуться. Если теория струн верна, то объяснения свойств частиц, которые нашли экспериментаторы, *существуют*, и они должны быть найдены среди резонансных мод колебаний, которым может быть подвержена струна. Если свойства этих мод колебаний будут соответствовать свойствам частиц из табл. 12.1 и 12.2, то, я думаю, это убедит даже непримиримых скептиков, вне зависимости от того, видел ли кто-нибудь протяжённую структуру самой струны непосредственно, или нет. И помимо подтверждения теории струн как долгожданной единой теории, при таком соответствии между теорией и экспериментальными данными теория струн обеспечит первое фундаментальное объяснение, почему Вселенная такова, какова она есть.

Как же теория струн проходит это решающее испытание?

Слишком много колебаний

На первый взгляд, теория струн терпит крах. Для начала, существует бесконечное число различных способов колебаний струны; несколько первых из этой бесконечной серии схематически изображены на рис. 12.4. Однако табл. 12.1 и 12.2 содержат только конечный список частиц, так что с самого начала мы, кажется, имеем глубокое несоответствие между теорией струн и реальным миром. Более того, если мы математически проанализируем возможные энергии — и, следовательно, массы — этих колебательных мод, мы придём к другому существенному разногласию между теорией и наблюдениями. Массы допустимых мод колебаний струны не похожи на экспериментально измеренные массы частиц, выписанные в табл. 12.1 и 12.2. Нетрудно увидеть, почему.





В начале развития теории струн исследователи понимали, что жёсткость струны обратно пропорциональна её длине (квадрату её длины, более точно): в то время как длинные струны изгибаются легко, чем короче струна, тем жёстче она становится. В 1974 г., когда Шварц и Шерк предложили уменьшить размер струн так, чтобы они давали гравитационную силу правильной величины, они, следовательно, предложили также увеличить натяжение струн — в любых вариантах это приводит к натяжению около тысячи триллионов триллионов триллионов (10^{39}) т, что примерно в 1000000000000000000000000000000000000000 (10^{41}) раз больше натяжения обычной фортепианной струны. Теперь, если вы захотите изогнуть крохотную, чрезвычайно жёсткую струну одним из всё более сложных способов, как показано на рис. 12.4, вы поймёте, что чем больше имеется пиков и впадин, тем больше энергии вы должны передать струне. И наоборот, если струна вибрирует таким замысловатым образом, она содержит гигантское количество энергии. Таким образом, все способы колебаний струны, кроме простейших, являются очень высокоэнергетическими, и поэтому, благодаря формуле $E = mc^2$,

соответствуют частицам с гигантскими массами.

И говоря гигантские, я действительно имею в виду гигантские. Расчёты показывают, что массы колебаний струны следуют рядам, аналогичным музыкальным гармоникам: они все являются кратными фундаментальной массе, массе Планка, так же как все обертона музыкальной струны являются целыми кратными основной частоты или тона. По стандартам физики частиц планковская масса колоссальна — около десяти миллиардов миллиардов (10^{19}) масс протона, грубо говоря, порядка массы пылинки или бактерии. Так что возможные массы колебаний струны суть нуль масс Планка, одна масса Планка, две массы Планка, три массы Планка и т. д., что показывает, что все массы, кроме колебания струны с нулевой массой, чудовищно велики. [\[167\]](#)

Как вы видите, некоторые частицы в табл. 12.1 и 12.2 действительно являются безмассовыми, но большая часть нет. А ненулевые массы в этих таблицах дальше от планковской массы, чем султан Брунея от нужды в кредите. Таким образом, мы ясно видим, что массы известных частиц не соответствуют закономерности, предлагаемой теорией струн. Значит ли это, что теория струн закрыта? Вы могли бы так подумать, но это неверно. Наличие бесконечного списка мод колебаний, массы которых всё более удаляются от масс известных частиц, является вызовом, который теория должна преодолеть. Годы исследований открыли подающие надежды стратегии, как это сделать.

Для начала заметим, что эксперименты с известными типами частиц научили нас, что тяжёлые частицы имеют тенденцию быть нестабильными; обычно тяжёлые частицы быстро распадаются в дождь частиц меньшей массы, в конце концов генерируя легчайшие и более привычные частицы из табл. 12.1 и 12.2 (например, t -кварк распадается примерно за 10^{-24} с). Мы ожидаем, что это остаётся верным и для «сверхтяжёлых» мод колебаний струны, и это могло бы объяснить, почему, даже если такие моды колебаний массово возникали в ранней горячей Вселенной, до сегодняшнего дня их уцелело крайне мало или вообще ни одна. Даже если теория струн верна, нашим единственным шансом увидеть эти сверхтяжёлые моды колебаний будет произвести их в высокоэнергетических столкновениях в ускорителях частиц. Однако, так как современные ускорители могут достигнуть только энергий, по порядку величины эквивалентных тысяче масс протона, они слишком слабы, чтобы возбудить любые, кроме самых спокойных, моды колебаний теории струн. Таким образом, предсказание теории струн о башне частиц с массами,

начинающимися с величины в несколько миллионов миллиардов раз большей, чем достижимо для сегодняшней технологии, не конфликтует с наблюдениями.

Из этого объяснения также ясно, что контакт между теорией струн и физикой частиц будет касаться только самых низкоэнергетических — безмассовых — колебаний струны, поскольку другие находятся далеко за пределами того, что мы можем достигнуть с сегодняшней технологией. Но как быть с фактом, что большинство частиц в табл. 12.1 и 12.2 не являются безмассовыми? Это важная проблема, но менее трудная, чем сначала может показаться. Поскольку планковская масса огромна, даже наиболее массивные из известных частиц, t -кварки, весят всего только $116 \cdot 10^{-19}$ или около 10^{-17} от планковской массы. Что касается электрона, его вес составляет $34 \cdot 10^{-24}$ от планковской массы. Так что в первом приближении — с точностью лучше, чем один к 10^{17} , — все частицы в табл. 12.1 и 12.2 имеют массы, равные нулю планковских масс (это примерно как большинство состояний жителей Земли в первом приближении равно нулю по сравнению с состоянием султана Брунея) — точно так, как и «предсказано» теорией струн. Нашей целью является улучшить это приближение и показать, что теория струн объясняет мелкие отклонения масс от нуля, характерные для частиц в табл. 12.1 и 12.2. Но безмассовые моды колебаний не настолько сильно не соответствуют данным опыта, как вы могли бы сначала подумать.

Это ободряет, но внимательный анализ обнаруживает дальнейшие проблемы. Используя уравнения теории суперструн, физики составили список всех безмассовых мод колебаний струны. Одна из записей соответствует гравитону со спином 2, и это большой успех, благодаря которому всё и началось; это гарантирует, что гравитация является частью квантовой теории струн. Но расчёты также показывают, что имеется намного больше безмассовых мод колебаний со спином 1, чем имеется частиц в табл. 12.2, и имеется много больше безмассовых мод колебаний со спином $1/2$, чем имеется частиц в табл. 12.1. Более того, список мод колебаний со спином $1/2$ не показывает признаков существования повторяющихся групп, напоминающих поколения частиц в табл. 12.1. При поверхностном анализе кажется, что очень трудно увидеть, как колебания струн могут соответствовать известными типам частиц.

Таким образом, к середине 1980-х гг. были основания для оптимизма по поводу теории суперструн, но также существовали и причины для скепсиса. Несомненно, теория суперструн представляла огромный шаг к

унификации. Обеспечив первый состоятельный подход к соединению гравитации и квантовой механики, она сделала для физики то же, что сделал Роджер Баннистер в 1954 г. для забега на милю, «выбежав» из четырёх минут: она показала, что кажущееся невозможным возможно. Теория суперструн определённо установила, что мы можем прорваться через кажущийся непроходимым барьер, разделяющий два столпа физики двадцатого столетия.

Однако в попытках идти дальше и показать, что теория суперструн может объяснить детальные свойства материи и сил природы, физики столкнулись с трудностями. Это привело скептиков к заявлению, что теория суперструн, несмотря на весь её потенциал унификации, является просто математической структурой, напрямую никак не связанной с физической Вселенной.

Даже при всех тех проблемах, которые мы сейчас обсуждали, во главе списка проблем теории суперструн, составленного скептиками, была особенность, с которой мне пора вас познакомить. Теория суперструн действительно обеспечивает успешное соединение гравитации и квантовой механики, единственно свободное от математической несостоятельности, которая была бедствием всех предыдущих попыток. Однако, хотя это может звучать странно, в первые годы после её открытия физики нашли, что уравнения теории суперструн не имеют этих завидных свойств, если Вселенная имеет три пространственных измерения. Уравнения теории струн математически состоятельны, только если Вселенная имеет *девять* пространственных измерений, или, включая временное измерение, они работают только во Вселенной с десятью пространственно-временными измерениями!

В сравнении с этим странно звучащим утверждением проблемы в установлении точного соответствия между модами колебаний струн и известными типами частиц кажутся второстепенной проблемой. Теория суперструн требует существования шести измерений пространства, которых никто никогда не видел. Это не мелкая деталь — это *действительно* проблема.

Или они существуют?

Теоретические открытия, сделанные в течение первых десятилетий XX в., задолго до появления на сцене теории струн, показали, что дополнительные измерения совсем не обязаны быть проблемой. И, переосмыслив эту проблематику, в конце XX в. физики показали, что эти дополнительные измерения дают возможность перекинуть мост через пропасть между модами колебаний в теории струн и элементарными

частицами, открытыми экспериментаторами.

Это одно из самых впечатляющих достижений теории; посмотрим, как это работает.

Объединение в высших измерениях

В 1919 г. Эйнштейн получил статью, которую легко можно было выбросить как бред сумасшедшего. Она была написана малоизвестным немецким математиком по имени Теодор Калуца и в нескольких коротких страницах закладывала подход к объединению двух сил, известных в то время, — гравитации и электромагнетизма. Чтобы достигнуть этой цели, Калуца предложил радикальный отказ от кое-чего настолько основополагающего, считавшегося гарантированным в такой степени, что, казалось бы, не может вызывать никаких вопросов. Он предположил, что Вселенная имеет не три пространственных измерения. Калуца попросил Эйнштейна и остальное физическое сообщество принять во внимание возможность, что Вселенная имеет *четыре* пространственных измерения, так что вместе с временем она имеет пять пространственно-временных измерений.

Во-первых, что это вообще означает? Когда мы говорим, что имеется три пространственных измерения, мы имеем в виду, что имеется три независимых направления, или оси, вдоль которых вы можете двигаться. Из вашего текущего положения вы можете описать их как влево/вправо, назад/вперёд и вверх/вниз; во Вселенной с тремя пространственными измерениями любое движение, которое вы предпринимаете, является некоторой комбинацией движений в этих трёх направлениях. Другими словами, во Вселенной с тремя пространственными измерениями вам нужно три блока информации, чтобы определить положение. В городе, например, чтобы определить, где у вас вечеринка, вам нужно знать улицу, где стоит здание, номер дома по этой улице и номер этажа. А если вы ещё хотите сказать людям, до какого момента еда будет ещё горячей, вам также надо определить четвёртый блок данных: время. Это то, что мы имеем в виду, говоря, что пространство-время четырёхмерно.

Калуца предположил, что в дополнение к осям влево/вправо, назад/вперёд и вверх/вниз *Вселенная на самом деле имеет ещё одно пространственное измерение, которое по некоторым причинам никто никогда не видел*. Если это так, то это означает, что имеется ещё одно независимое направление, в котором могут осуществляться движения, и,

следовательно, нам нужно задать четыре блока данных, чтобы определить точное положение в пространстве, и всего пять блоков данных, если мы также определяем время.

Вот что предлагала статья, полученная Эйнштейном в апреле 1919 г. Спрашивается, почему Эйнштейн её не выбросил? Мы не видим другое пространственное измерение — нам никогда не приходилось бесцельно плутать из-за того, что улица, номер дома и номер этажа почему-то недостаточны, чтобы определить адрес, — так почему же стоит рассматривать такую странную идею? А вот почему. Калуца обнаружил, что уравнения общей теории относительности Эйнштейна могут быть легко и красиво математически расширены на Вселенную, которая имеет на одно пространственное измерение больше. Калуца предпринял это расширение и обнаружил, что версия общей теории относительности с большим числом измерений не только включает исходные уравнения гравитации Эйнштейна, но вследствие дополнительного пространственного измерения также и дополнительные уравнения. Когда Калуца изучил эти дополнительные уравнения, он открыл нечто чрезвычайное: дополнительные уравнения были не чем иным, как уравнениями, которые в XIX в. открыл Максвелл для описания электромагнитного поля! Представив Вселенную с одним новым пространственным измерением, Калуца предложил решение проблемы, которую Эйнштейн рассматривал как одну из самых важных проблем всей физики. *Калуца нашёл схему, которая объединила уравнения общей теории относительности Эйнштейна с уравнениями электромагнетизма Максвелла.* Вот почему Эйнштейн не выбросил статью Калуцы.

Интуитивно, вы можете представить предложение Калуцы следующим образом. В общей теории относительности Эйнштейн заставил двигаться пространство и время. Эйнштейн понял, что искривление и растяжение пространства и времени есть геометрическое воплощение гравитационной силы. В статье Калуцы предполагалось, что геометрическое богатство пространства и времени ещё больше. В то время как Эйнштейн нашёл, что гравитационные поля могут быть описаны как деформации и рябь в трёх обычных пространственных и одном времённом измерении, Калуца обнаружил, что во Вселенной с дополнительным пространственным измерением могли бы быть дополнительные деформации и неровности. И эти деформации и неровности, как показал его анализ, могли бы в точности подойти для описания электромагнитного поля. В руках Калуцы геометрический подход к пониманию Вселенной самого Эйнштейна продемонстрировал достаточную силу, чтобы объединить гравитацию и

электромагнетизм.

Конечно, проблема осталась. Хотя математика работала, но как не было, так и до сих пор нет свидетельств существования пространственного измерения за пределами трёх, о которых мы все знаем. Так что же, открытие Калуцы было всего лишь курьёзом, или оно имеет какое-то отношение к нашей Вселенной? Калуца очень доверял теории — он, например, учился плавать путём изучения учебника по плаванию и только лишь затем путём плавания в море, — но идея о невидимом пространственном измерении, независимо от того, насколько неотразима теория, всё же звучит слишком вызывающе. Затем в 1926 г. шведский физик Оскар Клейн добавил к идее Калуцы новый поворот, который может объяснить, где скрываются дополнительные измерения.

Скрытые измерения

Чтобы понять идею Клейна, представим Филиппа Пети^[78], гуляющего по длинному покрытому резиной канату, туго растянутому между горами Эверест и Лхоцзе. Разглядываемый с расстояния многих километров, как на рис. 12.5, канат выглядит как одномерный объект вроде линии — объект, который имеет протяжённость только вдоль своей длины. Если мы узнаем, что вдоль каната навстречу Филиппу ползёт крохотный червячок, мы будем изо всех сил кричать Филиппу, чтобы он остановился, чтобы избежать беды. Конечно, после короткого размышления мы сообразим, что канат имеет дополнительную поверхность, кроме измерения влево/вправо, которое мы можем непосредственно воспринимать. Хотя её трудно различить невооружённым взглядом с большого расстояния, но поверхность каната имеет второе измерение: измерение по и против часовой стрелки, измерение, которое «закручено» вокруг каната. С помощью скромного телескопа это циклическое измерение становится видимым, и мы видим, что червяк может двигаться не только по длинному, развёрнутому измерению влево/вправо, но также и по короткому, «скрученному» направлению по/против часовой стрелки. Так что в каждой точке каната червяк имеет два независимых направления, по которым он может двигаться (это то, что мы имеем в виду, когда мы говорим, что поверхность каната двумерна^[79]), поэтому он может безопасно освободить дорогу Филиппу или уползая от него вперёд, или отползая вдоль маленького циклического измерения вбок и давая возможность Филиппу пройти мимо.

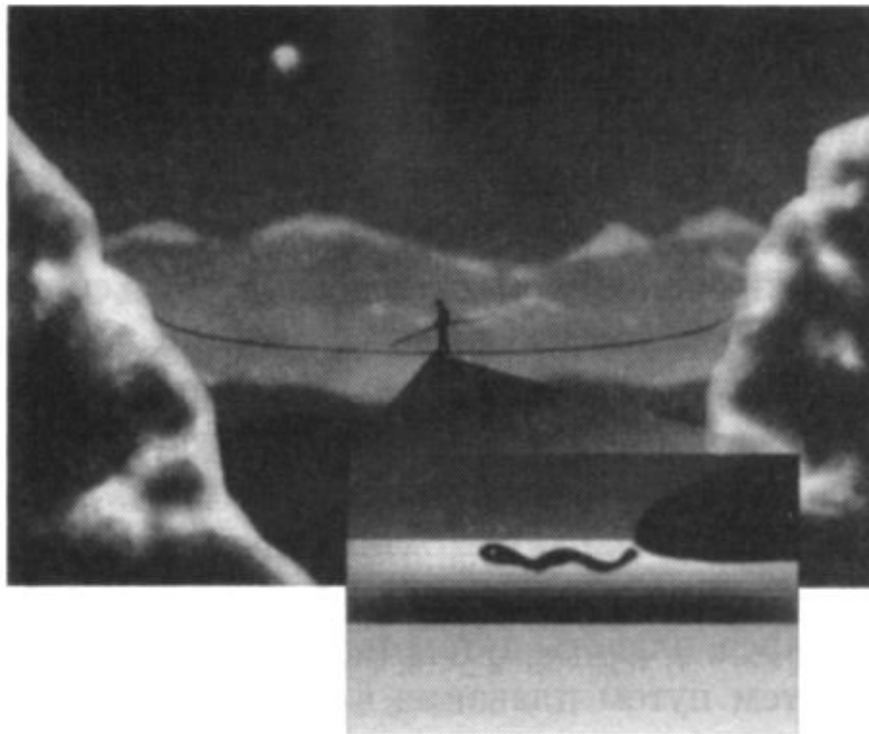


Рис. 12.5. На удалении туго натянутый канат или провод выглядит одномерным, хотя в достаточно сильный телескоп его второе, скрученное измерение становится видимым

На примере каната видно, что измерения — независимые направления, в которых что-либо может двигаться, — выступают в двух качественно различных вариантах. Они могут быть большими и легко видимыми, как размерность поверхности каната влево/вправо, или они могут быть маленькими и более трудно различимыми, как размерность по/против часовой стрелки, которая закручена вокруг поверхности каната. В этом примере не является большой проблемой увидеть маленький круговой ободок на поверхности каната. Всё, что нам нужно было, это подходящий увеличительный инструмент. Но, как вы можете представить, чем меньше скрученное измерение, тем труднее его будет обнаружить. Одно дело, на расстоянии нескольких километров обнаружить циклическое измерение поверхности каната; но совсем другое — обнаружить циклическое измерение чего-то столь тонкого, как зубная нить или тончайшее нервное волокно.

Вклад Клейна заключался в предположении, согласно которому то, что справедливо для объектов *внутри* Вселенной, может быть справедливо и

для ткани самой Вселенной. А именно, точно так же, как поверхность каната имеет как большое, так и маленькое измерение, так и ткань пространства может иметь большие и маленькие размерности. Может оказаться, что три известных всем нам измерения — влево/вправо, назад/вперёд, вверх/вниз — подобны горизонтальной протяжённости каната; они являются большими размерностями, легко видимой разновидностью измерений. Но точно так же, как поверхность каната имеет маленькое дополнительное циклическое измерение, может быть и ткань пространства также имеет настолько маленькое дополнительное циклическое измерение, что ни у кого нет достаточно мощного увеличительного устройства, чтобы обнаружить его существование. Вследствие его ничтожного размера, утверждал Клейн, это измерение будет скрытым.

Насколько мало маленькое? Математический анализ Клейна, в котором использовались некоторые свойства квантовой механики вместе с оригинальным предложением Калуцы, показал, что радиус дополнительного циклического пространственного измерения, вероятно, будет порядка планковской длины,^{[1168](#)} что определённо слишком мало, чтобы он был доступен для экспериментального обнаружения (самое совершенное современное оборудование не позволяет рассмотреть что-либо меньшее, чем одна тысячная размера атомного ядра, а это не дотягивает до планковской длины более миллиона миллиардов раз). Однако для воображаемого червяка планковского размера это крошечное скрученное циклическое измерение обеспечит новое направление, в котором он может странствовать так же свободно, как обычный червяк использует циклическое измерение каната на рис. 12.5. Конечно, точно так же, как обычный червяк обнаружит, что в направлении по часовой стрелке вокруг каната есть не так-то много пространства для исследования, прежде чем он наткнётся на свой собственный хвост и окажется в стартовой точке, червячок планковской длины, ползущий вдоль скрученного измерения пространства, также будет постоянно возвращаться назад к началу пути. Но, не взирая на длину путешествия, которое он может предпринять, скрученное измерение предоставляло бы направление, в котором крохотный червячок мог бы двигаться так же легко, как он это делает в трёх привычных развёрнутых измерениях.

Чтобы интуитивно почувствовать, на что это похоже, отметим, что то, что мы называем скрученным измерением каната, — направление по/против часовой стрелки, — *существует в каждой точке вдоль его протяжённого измерения*. Обычный червяк может сделать круг по замкнутому циклическому измерению в любой точке вдоль длины каната,

так что поверхность каната может быть описана как имеющая одно протяжённое измерение, к каждой точке которого прикреплено крохотное циклическое измерение, как на рис. 12.6. Этот образ полезно иметь в уме, поскольку он также применим к предложению Клейна о том, где прячется дополнительное пространственное измерение Калуцы.

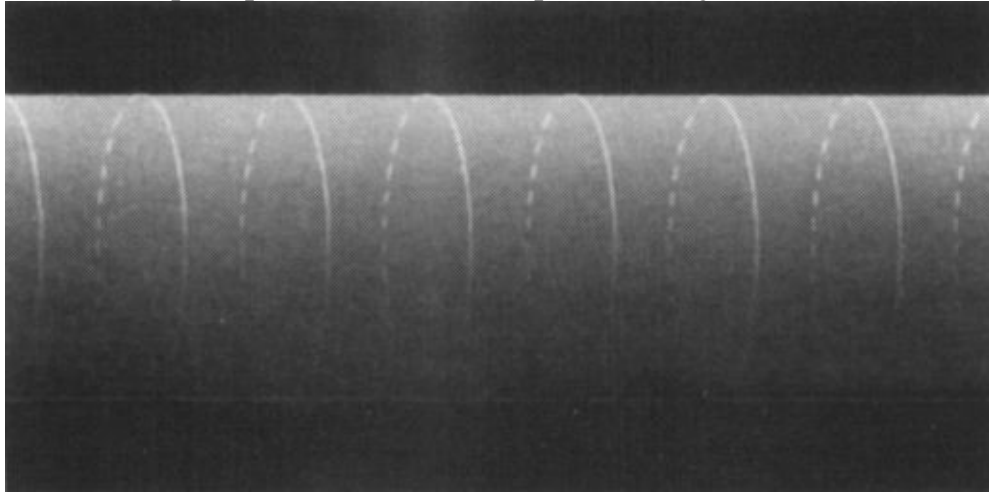


Рис. 12.6. Поверхность натянутого каната имеет одно протяжённое измерение, к каждой точке которого прикреплено крохотное циклическое измерение

Чтобы увидеть это, рассмотрим ткань пространства снова путём последовательной демонстрации её структуры на всё меньших масштабах длины, как на рис. 12.7. На первых нескольких уровнях увеличения ничего нового не обнаруживается: ткань пространства всё ещё выглядит трёхмерной (что, как обычно, мы схематически представляем на картинке в виде двумерной сетки). Однако когда мы доберёмся до планковского масштаба, т. е. до наибольшего увеличения, представленного на рисунке, Клейн предполагает, что новое, скрученное измерение станет видимым. Точно так же, как циклическое измерение каната существует в каждой точке его видимого протяжённого измерения, циклическое измерение, в соответствии с этим предложением, существует в каждой точке обычных трёх протяжённых измерений повседневной жизни. На рис. 12.7 мы показали это, дорисовав дополнительное циклическое измерение только в некоторых точках протяжённых измерений (поскольку рисование окружностей в каждой точке закроет весь рисунок), и вы немедленно можете увидеть сходство с канатом на рис. 12.6. В предложении Клейна, следовательно, пространство должно представляться как имеющее три протяжённых измерения (из которых мы показали на рисунке только два) с

дополнительным циклическим измерением, присоединённым к каждой точке. Отметим, что дополнительное измерение не есть выпуклость или петля внутри обычных трёх пространственных измерений, как могут заставить вас подумать ограниченные возможности графики. Дополнительное измерение есть новое измерение, совершенно отличное от трёх, известных нам, которое существует в каждой точке в нашем обычном трёхмерном пространстве, но столь мало, что ускользает от обнаружения даже нашими самыми мощными инструментами.

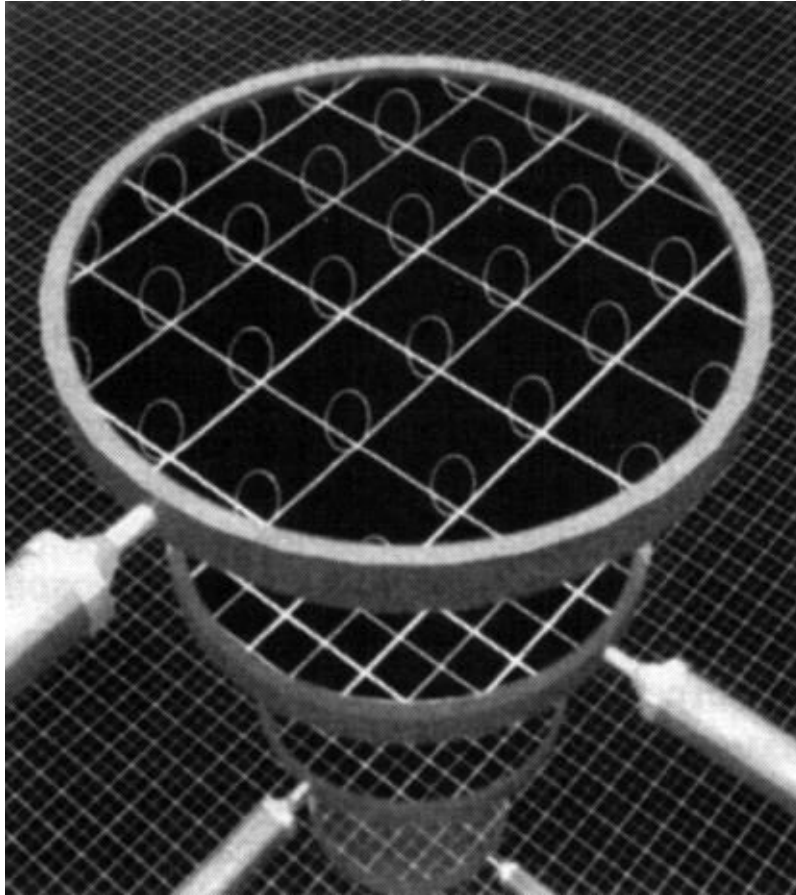


Рис. 12.7. Предложение Калуцы и Клейна заключается в том, что на очень малых масштабах пространство имеет дополнительное циклическое измерение, присоединённое к каждой точке обычного пространства

С помощью такой модификации исходной идеи Калуцы Клейн смог объяснить, как Вселенная может иметь более трёх пространственных измерений и при этом дополнительное измерение остаётся скрытым; эта схема с тех пор стала известна как теория Калуцы-Клейна. А поскольку дополнительное измерение пространства — это всё, что требовалось

Калуце для объединения общей теории относительности с электромагнетизмом, теория Калуцы-Клейна могла бы показаться именно тем, что искал Эйнштейн. Действительно, Эйнштейн и многие другие стали просто одержимы идеей унификации с помощью нового, скрытого пространственного измерения, и были предприняты решительные усилия, чтобы понять, будет ли этот подход работать во всех деталях. Но незадолго до этого теория Калуцы-Клейна столкнулась со своими собственными проблемами. Вероятно, самая заметная из всех заключалась в том, что попытки включить в картину с дополнительным измерением электрон продемонстрировали свою несостоятельность.^{169} Эйнштейн продолжил биться над схемой Калуцы-Клейна по меньшей мере до начала 1940-х гг., но первоначальные обещания этого подхода так и не материализовались, и интерес постепенно сошёл на нет.

Однако несколько десятилетий спустя произошло эффектное возвращение теории Калуцы-Клейна.

Теория струн и скрытые измерения

В дополнение к трудностям, с которыми теория Калуцы-Клейна столкнулась при попытке описать микромир, у учёных была и другая причина сомневаться в этом подходе. Многие находили постулирование скрытой пространственной размерности и произвольным, и экстравагантным. Калуца пришёл к идее нового пространственного измерения не на основании жёсткой цепочки дедуктивных рассуждений. Нет, он взял идею просто с потолка, а после анализа её следствий открылись неожиданные связи между общей теорией относительности и электромагнетизмом. Таким образом, хотя это было само по себе большое открытие, оно страдало отсутствием ощущения его необходимости. Если бы вы спросили Калуцу и Клейна, *почему* Вселенная имеет пять пространственно-временных измерений, а не четыре, или шесть, или семь, или 7000, коли на то пошло, они не смогли бы дать более убедительный ответ, чем «Почему бы и нет?».

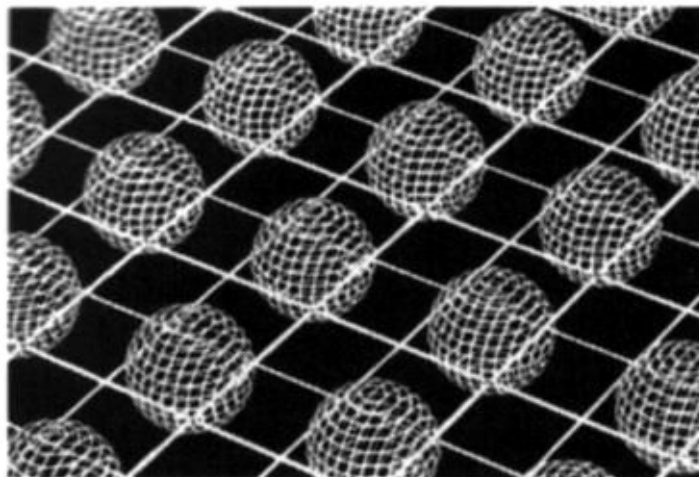
Более чем через три десятилетия ситуация радикально изменилась. Теория струн является первым подходом для объединения общей теории относительности и квантовой механики; более того, она имеет потенциал для объединения нашего понимания всех сил и всей материи. Но квантово-механические уравнения теории струн не работают ни в четырёх пространственно-временных измерениях, ни в пяти, шести, семи или 7000.

По причинам, обсуждающимся в следующем разделе, уравнения теории струн работают только в десяти пространственно-временных измерениях — девяти пространственных плюс время. Теория струн *требует* больше измерений.

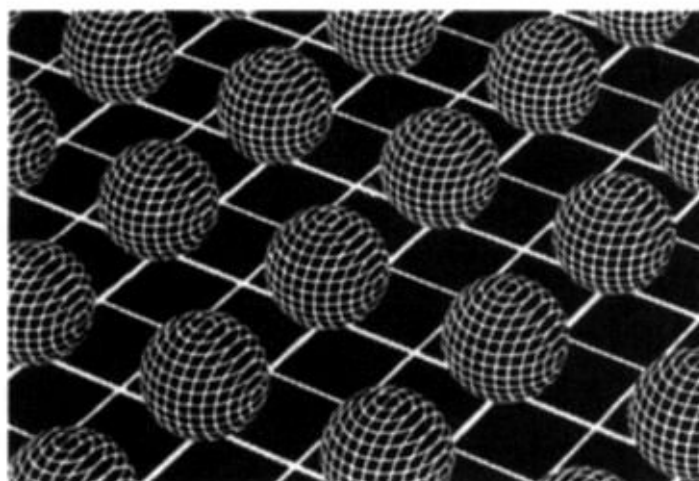
Это абсолютно новый вид результата, с которым никогда раньше не сталкивались в истории физики. До струн ни одна теория совсем ничего не говорила о числе пространственных измерений во Вселенной. Все теории от Ньютона до Максвелла и Эйнштейна полагали, что Вселенная имеет три пространственных измерения, так же, как мы все полагаем, что солнце завтра взойдёт. Калуца и Клейн предложили поставить это под вопрос, выдвинув мысль, что имеется четыре пространственных измерения, но это означало только другое допущение; пусть и отличное, но всё равно допущение. Теперь же впервые теория струн предлагала уравнения, которые предсказывали число пространственных измерений. Вычисление — не допущение, не гипотеза, не инспирированная чем-то догадка — определяет число пространственных измерений в теории струн, и удивительным оказалось то, что это вычисленное число равно не трём, а девяти. Теория струн неотвратно привела нас к Вселенной с шестью дополнительными пространственными измерениями и потому обеспечила убедительный, готовый к употреблению контекст для использования идей Калуцы и Клейна.

Оригинальное предложение Калуцы и Клейна предполагало только одно скрытое измерение, но оно легко обобщается на два, три или даже шесть дополнительных измерений, требуемых теорией струн. Например, на рис. 12.8а мы заменили дополнительное циклическое измерение — одномерную форму рис. 12.7, на поверхность сферы, двумерную форму (как упоминалось в главе 8, поверхность сферы является двумерной, поскольку вам нужны два блока данных — вроде широты и долготы на земной поверхности, — чтобы определить положение). Как и в примере с окружностью, вы должны представлять сферу прикреплённой к каждой точке обычных измерений, хотя на рис. 12.8а, чтобы оставить рисунок ясным, мы нарисовали только те сферы, которые лежат на пересечениях линий сетки. В такой Вселенной для того чтобы определить положение в пространстве, вам бы понадобилось всего пять блоков данных: три блока, чтобы определить ваше положение в протяжённых измерениях (улица, номер дома, номер этажа) и два блока, чтобы определить ваше положение на сфере, прикреплённой к этой точке (широта, долгота). Безусловно, если радиус сферы очень мал — в миллиарды раз меньше, чем атом, — последние два блока данных почти не будут иметь значения для

относительно больших объектов вроде нас самих. Тем не менее дополнительная размерность является неотъемлемой частью ультрамикроскопического строения пространственной ткани. Ультрамикроскопическому червячку понадобятся все пять блоков данных, а если мы включим время, ему потребуется шесть блоков данных, чтобы указать, где будет вечеринка и в какое время.



a)



б)

Рис. 12.8. Соединение Вселенной с тремя обычными измерениями, представленными сеткой, и (a) двух свёрнутых измерений в форме пустых сфер; (б) трёх свёрнутых измерений в форме сплошных шаров

Продвинемся ещё на одно измерение дальше. На рис. 12.8a мы рассмотрели только поверхность сфер. Представьте теперь, что ткань

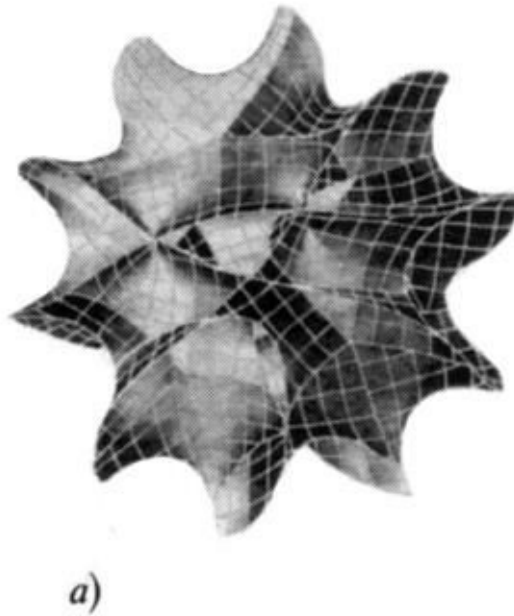
пространства включает также и внутренность сфер, как на рис. 12.8б, — наш планковский червячок может проникнуть во внутренность сферы, как обычный червяк это делает с яблоком, и свободно там передвигаться. Чтобы определить положение червяка, теперь требуется шесть блоков информации: три, чтобы определить его положение в обычных протяжённых пространственных измерениях, и ещё три, чтобы определить его положение в шаре, прикрепленном к данной точке (широта, долгота, глубина проникновения). Вместе со временем, следовательно, это есть пример Вселенной с семью пространственно-временными измерениями.

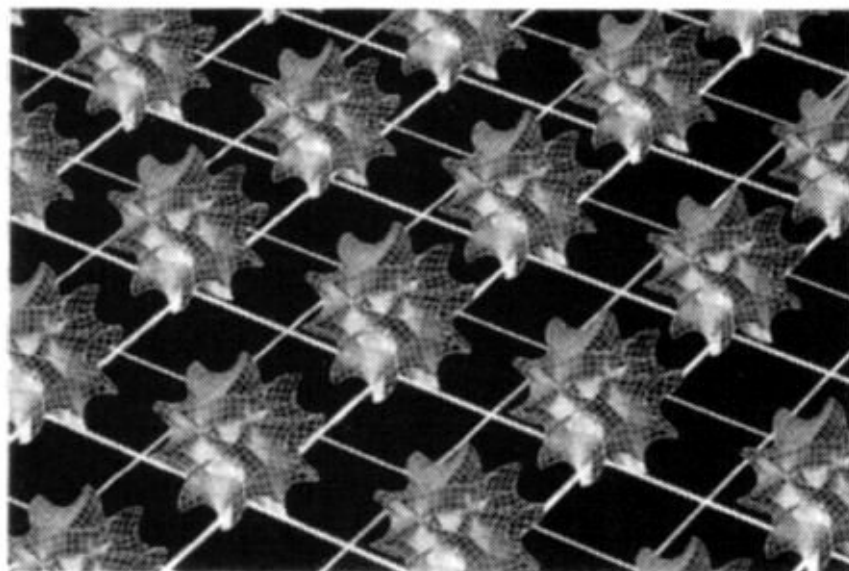
Теперь сделаем скачок. Хотя это невозможно нарисовать, представьте, что в каждой точке в трёх протяжённых измерениях повседневной жизни Вселенная имеет не одно дополнительное измерение как на рис. 12.7, не два дополнительных измерения, как на рис. 12.8а, не три дополнительных измерения, как на рис. 12.8б, но шесть дополнительных пространственных измерений. Я, конечно, не могу визуализировать это, и я никогда не встречал никого, кто бы смог. Но смысл ясен. Чтобы задать пространственное положение червячка планковского размера в такой Вселенной, требуется девять блоков данных: три, чтобы задать его положение в обычных протяжённых измерениях, и ещё шесть, чтобы определить его положение в свёрнутых измерениях, прикрепленных к этой точке. Когда принимается во внимание и время, это оказывается Вселенной с десятимерным пространством-временем, как требуют уравнения теории струн. Если дополнительные шесть измерений свёрнуты в достаточно малые образования, они легко ускользнут от обнаружения.

Форма скрытых измерений

Уравнения теории струн на самом деле определяют больше, чем просто число пространственных измерений. Они также определяют, какую форму могут принимать дополнительные размерности.^{[170](#)} На предыдущих рисунках мы сосредоточились на простейших формах — окружности, полые сферы, сплошные шары, — но уравнения теории струн выбирают существенно более сложный класс шестимерных форм, известных как пространства или многообразия Калаби–Яу. Эти пространства названы в честь двух математиков, Эугенио Калаби и Шин-Тун Яу, которые математически открыли их задолго до того, как была понята их связь с теорией струн; грубая иллюстрация одного примера дана на рис. 12.9а. Надо иметь в виду, что на этом рисунке двумерное

изображение иллюстрирует шестимерный объект, и это приводит к большому числу существенных искажений. Даже в этих условиях рисунок даёт грубое представление о том, на что похожи эти многообразия. Если то частное пространство Калаби–Яу, которое показано на рис. 12.9а, составляет дополнительные шесть измерений теории струн, то пространство на ультрамикроскопическом масштабе будет иметь вид, показанный на рис. 12.9б. Поскольку пространство Калаби–Яу прикреплено к каждой точке в трёх обычных измерениях, вы, и я, и кто угодно другой окружены и заполнены этими маленькими формами. Буквально, если вы перемещаетесь из одного места в другое, ваше тело будет двигаться через все девять измерений, быстро и последовательно проходя через целые многообразия, так что в среднем кажется, будто вы вовсе не двигаетесь через шесть дополнительных измерений.





б)

Рис. 12.9. (а) Один из примеров многообразия (или пространства) Калаби–Яу. (б) Сильно увеличенный участок пространства с дополнительными измерениями в форме мельчайших пространств Калаби–Яу

Если эти идеи верны, ультрамикроскопическая ткань космоса украшена богатейшей текстурой.

Физика струн и дополнительные измерения

Красота общей теории относительности в том, что физика гравитации контролируется геометрией пространства. С дополнительными пространственными измерениями, предлагаемыми теорией струн, вы, естественно, можете предположить, что мощь геометрии в определении физики может значительно возрасти. И это действительно так. Чтобы это увидеть, рассмотрим вопрос, который я до сих пор обходил стороной. Почему теория струн требует десять пространственно-временных измерений? Это вопрос, на который трудно ответить без привлечения математики, но я попытаюсь объяснить, как это получается в результате взаимодействия геометрии и физики.

Представьте струну, которая может колебаться только вдоль двумерной поверхности плоского стола. Струна будет в состоянии колебаться разными способами, но только такими, которые включают движения в направлениях

вправо/влево и вперёд/назад на поверхности стола. Если теперь струне позволить колебаться в третьем направлении, двигаясь в направлении вверх/вниз, которое выходит за пределы поверхности стола, становятся допустимыми дополнительные моды колебаний. Итак, хотя это и трудно изобразить более чем в трёх измерениях, это заключение — большее количество измерений означает большее количество мод колебаний — является общим. Если струна может колебаться в четвёртом пространственном измерении, она может колебаться большим числом способов, по сравнению с тремя измерениями; если струна может колебаться в пятом пространственном измерении, она может проявить больше способов колебаний, чем это было только в четырёх измерениях; и т. д. Это важный вывод, поскольку в теории струн имеется уравнение, которое требует, чтобы число независимых способов колебаний удовлетворяло очень точному ограничению. Если ограничение нарушается, математика теории струн разваливается и её уравнения становятся бессмысленными. Во Вселенной с тремя пространственными измерениями число способов колебаний слишком мало и ограничение не выполняется; с четырьмя пространственными измерениями число способов колебаний всё ещё слишком мало; для пяти, шести, семи или восьми измерений оно всё ещё слишком мало; но для девяти пространственных измерений ограничение на число способов колебаний выполняется в точности. Именно так теория струн определяет число пространственных измерений.

[\[80\]{171}](#)

Хотя это хорошо иллюстрирует взаимодействие геометрии и физики, их связь в рамках теории струн идёт ещё дальше и, фактически, обеспечивает способ решения критической проблемы, с которой мы сталкивались ранее. Напомним, что в попытках установить детальную связь между модами колебаний струны и известными семействами частиц физики потерпели крах. Они нашли, что имеется слишком много безмассовых мод колебаний струны и, более того, точные свойства мод колебаний не соответствуют свойствам известных частиц материи и переносчиков взаимодействий. Но, хотя такие вычисления и принимали в расчёт *число* дополнительных измерений (отчасти объясняя, почему было найдено так много способов колебаний струн), они не принимали в расчёт малый размер и сложную *форму* дополнительных измерений — они предполагали, что все пространственные измерения плоские и полностью развёрнутые, — а это приводит к существенным отличиям. Я не упоминал об этом раньше, поскольку мы тогда ещё не обсуждали идею дополнительных измерений.

Струны столь малы, что даже когда дополнительные шесть измерений свёрнуты в пространство Калаби–Яу, они могут колебаться в этих направлениях. Это чрезвычайно важно по двум причинам. Во-первых, это обеспечивает, что струны всегда колеблются во всех девяти пространственных измерениях, и потому условие на число мод колебаний продолжает выполняться, даже когда дополнительные измерения свёрнуты. Во-вторых, точно так же, как на колебания потока воздуха, продуваемого через трубу, влияют повороты и изгибы музыкального инструмента, моды колебаний струн подвергаются воздействию искривлений и поворотов в геометрии дополнительных шести измерений. Если вы изменили форму трубы, сделав путь прохождения воздуха более узким или сделав трубу длиннее, моды колебаний воздуха и, следовательно, звук инструмента изменятся. Аналогично, если форму и размер дополнительных измерений модифицировать, это также существенно повлияет на точные свойства возможных способов колебаний струны. А поскольку способ колебания струны определяет её массу и заряд, то это значит, что дополнительные измерения играют центральную роль в определении свойств частиц.

Это ключевое заключение. *Точный размер и форма дополнительных измерений оказывают чрезвычайное воздействие на моды колебаний струн, а значит, на свойства частиц.* Поскольку базовая структура Вселенной — от формирования галактик и звёзд до существования жизни, как мы её знаем, — чувствительно зависит от свойств частиц, код космоса вполне может быть записан в геометрии пространства Калаби–Яу.

На рис. 12.9 был представлен один пример пространства Калаби–Яу, но имеются по меньшей мере сотни тысяч других возможностей. Тогда вопрос заключается в том, которое из многообразий Калаби–Яу, если это действительно имеет место, соответствует части пространственно-временной ткани, связанной с дополнительными измерениями. Это один из наиболее важных вопросов, стоящих перед теорией струн, поскольку только при определённом выборе пространства Калаби–Яу детально определяются свойства колебательных мод струны. На сегодняшний день этот вопрос остаётся без ответа. Причина в том, что текущее понимание уравнений теории струн не обеспечивает решение задачи о выборе одной формы из многих; с точки зрения известных уравнений каждое пространство Калаби–Яу так же пригодно, как и любое другое. Уравнения даже не определяют размера дополнительных измерений. Поскольку мы не видим дополнительных измерений, они должны быть малы, но вопрос о том, насколько именно малы, остаётся открытым.

Является ли это фатальным пороком теории? Возможно. Но я так не

думаю. Как мы будем подробнее обсуждать в следующей главе, точные уравнения теории струн ускользают от теоретиков в течение многих лет, поэтому во многих работах использовались приближённые уравнения. Это позволило выделить многие свойства теории струн, но в некоторых вопросах — включая точный размер и форму дополнительных измерений — приближённых уравнений недостаточно. Поскольку мы продолжаем уточнять наш математический анализ и совершенствовать эти приближённые уравнения, определение формы дополнительных измерений является первой — и, на мой взгляд, достижимой — целью. Но до сих пор эта цель остаётся за пределами достигнутого.

Тем не менее мы можем задаться вопросом, приводит ли выбор дополнительных измерений в форме пространства Калаби–Яу к модам колебаний струны, которые близко аппроксимируют известные частицы. И здесь ответ вполне удовлетворительный.

Хотя мы далеки от того, чтобы исследовать все возможности, но были найдены примеры пространств Калаби–Яу, которые приводят к модам колебаний струн, которые в грубом приближении согласуются с табл. 12.1 и 12.2. Например, в середине 1980-х гг. Филип Канделас, Гарри Горовиц, Эндрю Строминджер и Эдвард Виттен (команда физиков, которые обнаружили связь пространств Калаби–Яу с теорией струн) нашли, что каждая дырка (термин, используемый в точно определённом математическом смысле), содержащаяся в пространстве Калаби–Яу, приводит к семейству низкоэнергетических колебательных мод струны. Пространство Калаби–Яу с тремя дырками, следовательно, могло бы дать объяснение для повторяющейся структуры трёх поколений элементарных частиц в табл. 12.1. Действительно, был найден ряд таких «трёхдырочных» пространств Калаби–Яу. Более того, среди этих предпочтительных пространств Калаби–Яу есть такие, которые в точности дают как правильное число частиц — переносчиков взаимодействий, так и правильные электрические заряды и другие ядерные свойства частиц в табл. 12.1 и 12.2.

Это чрезвычайно воодушевляющий результат; он никоим образом не был гарантирован. В попытке соединить общую теорию относительности с квантовой механикой теория струн вполне могла бы остановиться на определённом этапе, обнаружив при этом невозможность каким-нибудь способом подобраться к решению столь же важной задачи объяснения свойств известных частиц материи и взаимодействий. Ввиду возможности такого малоутешительного исхода исследователи воспряли духом в надежде, что теория когда-нибудь засияет. Но идти дальше и рассчитать

точные массы частиц значительно труднее. Как мы говорили, частицы в табл. 12.1 и 12.2 имеют массы, которые отличаются от колебаний струны с наименьшей энергией, соответствующей нулю планковских масс — менее чем на одну миллионную от миллиардной доли планковской массы. Расчёты таких бесконечно малых отклонений требуют уровня точности, лежащего за пределами того, что мы можем получить с нашим сегодняшним пониманием уравнений теории струн.

Фактически, я подозреваю, как и многие другие струнные теоретики, что крохотные массы в табл. 12.1 и 12.2 возникают в теории струн почти так же, как это происходит и в стандартной модели. Напомним из главы 9, что в стандартной модели поле Хиггса имеет ненулевую величину во всём пространстве и масса частицы зависит от того, насколько большую тормозящую силу она испытывает, когда пробирается сквозь Хиггсов океан. Аналогичный сценарий, возможно, работает и в струнной теории. Если гигантское количество струн точно колеблется правильно скоординированным способом во всём пространстве, они могут создать однородный фон, который во всех смыслах и со всех точек зрения будет неотличим от океана Хиггса. Колебания струн, которые исходно имели нулевую массу, будут тогда обзаводиться малой ненулевой массой благодаря тормозящей силе, которую они испытывают, когда движутся и колеблются в струнной версии океана Хиггса.

Отметим, однако, что в стандартной модели тормозящая сила, испытываемая данной частицей, — а потому наделяющая её массой, — определяется экспериментальными измерениями и является внешним параметром теории. В версии теории струн тормозящая сила — и, следовательно, массы различных мод колебаний — будет порождаться взаимодействием между струнами (поскольку океан Хиггса будет создаваться струнами) и должна быть *вычислима*. Теория струн, по крайней мере в принципе, позволяет определить все свойства частиц из самой теории.

Никто ещё этого не сделал, но, как подчёркивалось, теория струн в очень значительной степени находится в состоянии развития. Со временем исследователи надеются полностью реализовать громадный потенциал этого подхода к объединению. Мотивация сильна, поскольку велика потенциальная награда. При большой работе и существенном везении теория струн может в один прекрасный день объяснить фундаментальные свойства частиц и, тем самым, объяснить, почему Вселенная такова, какова она есть.

Ткань космоса согласно теории струн

Хотя многое в теории струн всё ещё лежит вне границ нашего понимания, она уже продемонстрировала впечатляющие новые возможности. Самое поразительное, что, преодолевая пропасть между общей теорией относительности и квантовой механикой, теория струн обнаружила: ткань космоса может иметь намного больше измерений, чем мы непосредственно ощущаем, — измерений, которые могут оказаться ключом к решению некоторых самых глубоких тайн Вселенной. Более того, теория наводит на мысль, что привычные понятия пространства и времени, как мы их до сих пор понимали, могут быть не более чем приближениями к более фундаментальным концепциям, которые всё ещё ждут нашего открытия.

В начальные моменты Вселенной эти свойства пространственно-временной ткани, которые сегодня доступны только математически, должны были бы быть явными. Очень рано, когда три привычных пространственных измерения также были малы, различие между тем, что мы теперь называем большими измерениями и свёрнутыми измерениями теории струн, вероятно, было мало или совсем отсутствовало. Их современное различие в размерах должно быть следствием космологической эволюции, которая каким-то способом, всё ещё недостаточно для нас понятным, смогла как-то выделить три пространственных измерения и сделать только их объектом расширения в течение 14 млрд лет, как обсуждалось в предыдущих главах. Заглянув назад во времени ещё дальше, мы увидим, что вся наблюдаемая Вселенная будет сжата до субпланковских размеров, и то, что мы обозначали размытым пятном (на рис. 10.6), теперь мы можем идентифицировать с областью, где привычное пространство и время ещё только должны возникнуть из более фундаментальных сущностей, — чем бы они ни были, — и это мы пытаемся понять в настоящих исследованиях.

Дальнейший прогресс в понимании изначальной Вселенной, а потому в постижении истоков пространства, времени и стрелы времени, требует существенного усовершенствования теоретического инструментария, который мы используем для понимания теории струн, — цель, которая не так давно казалась хотя и благородной, но удалённой. Как мы увидим, с разработкой М-теории прогресс превзошёл многие даже самые оптимистические предсказания.

Глава 13. Вселенная на бране

Пространство и время с точки зрения М-теории

История теории струн — одна из самых извилистых среди всех других научных прорывов. Даже сегодня, спустя более чем три десятилетия после её зарождения, многие учёные полагают, что у нас ещё нет исчерпывающего ответа на элементарный вопрос: «Что такое теория струн?». Мы многое знаем о теории струн. Мы знаем её основные особенности, её главные достижения, её предсказания и проблемы; мы также можем использовать уравнения теории струн для предсказания того, как струны будут себя вести и взаимодействовать друг с другом в самых разных условиях. Но большинство исследователей чувствуют, что нашей сегодняшней формулировке теории струн всё ещё не хватает некоего основополагающего принципа, который мы обнаруживаем в центре любого другого крупного научного достижения. Специальная теория относительности зиждется на постоянстве скорости света. Общая теория относительности базируется на принципе эквивалентности. У квантовой механики есть принцип неопределённости. В теории струн всё ещё продолжается поиск аналогичного принципа, который столь же полно охватил бы суть теории.

В значительной степени эта нехватка центрального принципа вызвана тем, что теория струн разрабатывалась «по кусочкам», а не исходя из некоего глобального видения. Цель теории струн — объединение всех типов взаимодействий и всех типов материи в рамках единого квантово-механического формализма — величественна ровно настолько, насколько это есть, но развитие самой теории является явно фрагментированным. После своего счастливого открытия более чем три десятилетия назад теория струн постепенно выстраивалась, по мере того как одна группа теоретиков достигала успеха, изучая *одни* уравнения, а достижения другой группы строились на *других* уравнениях.

Учёных, занимающихся теорией струн, можно уподобить первобытному племени, раскапывающему зарытый в землю космический корабль, на который они случайно наткнулись. Копаясь вокруг корабля, племя постепенно устанавливает различные принципы работы космического корабля, и это подпитывает ощущение, что все кнопки и рычажки корабля должны работать каким-то скоординированным и единым образом. Аналогичное ощущение превалирует среди струнных теоретиков.

Результаты, полученные в ходе многих лет исследований, сближают друг с другом разные «куски» теории струн. Это вселяет растущую уверенность в то, что теория струн замкнётся в единую мощную и связную конструкцию, которая ещё должна быть полностью раскрыта, но которая в конечном счёте обнаружит внутреннюю структуру природы с непревзойдённой ясностью и полнотой.

За последнее время ничто не иллюстрирует это лучше, чем догадка, вызвавшая *вторую суперструнную революцию* — революцию, которая, среди прочего, вскрыла ещё одно пространственное измерение, вплетённое в ткань космоса, открыла новые возможности для экспериментальной проверки теории струн, привела к предположению, что наша Вселенная может неожиданно сталкиваться с другими Вселенными, показала, что чёрные дыры могут быть рождены уже на следующем поколении ускорителей элементарных частиц, а также привела к новой космологической теории, в которой время и его стрела, подобно грациозным кольцам Сатурна, могут вновь и вновь ходить по кругу.

Вторая суперструнная революция

В теории струн есть одна необычная деталь, которую я до сих пор утаивал, но которую могут вспомнить читатели моей предыдущей книги «Элегантная Вселенная». Дело в том, что за последние три десятилетия была разработана не одна, а *пять* различных версий теории струн. Приведу их названия, хотя они не очень важны: *теория струн типа I*, *теория струн типа IIA*, *теория струн типа IIB*, *теория О-гетеротических струн* и *теория E-гетеротических струн*. Все эти теории базируются на одних и тех же положениях, сформулированных в прошлой главе (элементарными составляющими являются нити вибрирующей энергии), и, как показали расчёты, проведённые в 1970-х и 1980-х гг., в каждой теории требуется шесть дополнительных пространственных измерений; однако при ближайшем рассмотрении обнаруживаются значительные различия между этими теориями. Например, теория струн типа I включает в себя колеблющиеся струнные петли, так называемые *замкнутые струны*, которые мы обсуждали в прошлой главе, но, в отличие от других версий теории струн, содержит также *открытые струны* — колеблющиеся отрезки струн с двумя свободными концами. Более того, расчёты показывают, что набор колебательных мод струн и способ их взаимодействия с другими модами отличаются друг от друга в различных

формулировках теории струн.

Самые оптимистические струнные теоретики надеялись на то, что эти различия приведут к исключению четырёх из пяти формулировок, когда дело дойдёт до сравнения теорий с экспериментальными данными. Но, откровенно говоря, сам факт существования пяти различных версий теории струн служил источником с трудом скрываемого дискомфорта. Ведь учёные мечтают о унификации, которая привела бы к единой теории Вселенной. Если бы было установлено, что только одна теоретическая конструкция может охватить как квантовую механику, так и общую теорию относительности, то теоретики достигли бы своей нирваны в этом объединении. Это послужило бы серьёзным основанием для веры в справедливость теории даже при отсутствии прямого экспериментального подтверждения. В конце концов, имеется изобилие экспериментальных данных, подтверждающих как квантовую механику, так и общую теорию относительности, и ясно как день, что законы, управляющие Вселенной, должны быть взаимно совместимы. Поэтому, если какая-то теория оказалась бы единственной математически состоятельной связкой, соединяющей два экспериментально подтверждённых столпа физики XX в., это дало бы мощное, хотя и косвенное, доказательство неизбежности этой теории.

Но из факта существования пяти различных версий теории струн, внешне похожих, но отличающихся в деталях, может показаться, что теория струн не проходит тест на единственность. Даже если однажды будут оправданы ожидания оптимистов, и только одна из пяти теорий струн будет подтверждена экспериментально, нас всё ещё будет мучить надоедливый вопрос: к чему четыре другие состоятельные формулировки? Будет ли это означать, что остальные четыре формулировки являются попросту математическими курьёзами? Имеют ли они какое-либо отношение к физическому миру? Не указывает ли их существование на верхушку теоретического айсберга, в котором учёные впоследствии найдут ещё пять-шесть-семь других или даже бесконечное число различных математических вариаций на тему струн?

В конце 1980-х — начале 1990-х гг. многие физики активно разрабатывали ту или иную версию теории струн, а загадка пяти версий, как правило, не была той проблемой, которой занимались ежедневно. Она была тем мучительным вопросом, решение которого постоянно откладывалось на неопределённое будущее, когда существенно улучшится понимание каждой отдельной струнной теории.

Но весной 1995 г., без всякого предупреждения, эти скромные

надежды были с лихвой вознаграждены. Опираясь на работы ряда физиков (включая Криса Халла, Пола Таунсенда, Ашока Сена, Майкла Даффа, Джона Шварца и многих других), Эдвард Виттен, в течение двух десятилетий являвшийся самым знаменитым струнным теоретиком, выявил скрытое единство, связывающее все пять версий теории струн. Виттен показал, что эти пять версий представляют собой не пять различных теорий, а всего лишь пять различных математических подходов к анализу *одной и той же* теории. Подобно тому как переводы книги на пять различных языков могут показаться несведущему в языках читателю пятью различными текстами, так и пять формулировок теории струн выглядели разными лишь из-за того, что до Виттена не было «словаря» для надлежащего перевода формулировок друг в друга. Но открытый Виттеном словарь убедительно показал, что, подобно единому тексту, с которого сделано пять различных переводов, все пять формулировок теории струн связывает единая теория. Объединяющая главная теория получила рабочее название *М-теории*, где буква «М» провоцирует различную расшифровку: Мистическая? Материнская? Матричная? Мембранная? Эта теория подстёгивает интенсивные усилия исследователей всего мира в поиске создания нового образа, высвеченного мощным озарением Виттена.

Это революционное открытие явилось большим шагом вперёд. Как Виттен показал в одной из самых выдающихся работ в этой области (и в следующей важной работе вместе с Петром Хоравой), теория струн *является* единой теорией. Теоретики, работающие в области теории струн, избавились от смущения при представлении своей теории в качестве кандидата на роль единой теории, искомой ещё Эйнштейном; ведь теперь никто не мог указать на отсутствие единства из-за того, что сама теория имеет пять различных версий. Метаобъединение самой теории струн, претендующей на роль единой теории, пришлось очень кстати. Благодаря работе Виттена идея объединения, включённая в каждую отдельную теорию струн, была распространена на всю концепцию струн.

На рис. 13.1 схематически представлен статус пяти теорий струн до открытия Виттена и после него; этот образ всегда полезно иметь в виду. Он иллюстрирует тот факт, что М-теория сама по себе не является новым подходом, но, «разгоняя облака», она обещает дать более тонкую и полную формулировку физических законов, чем позволяет дать любая из пяти версий теории струн. М-теория соединяет и охватывает все пять теорий струн, показывая, что каждая из них является частью более великого теоретического синтеза.

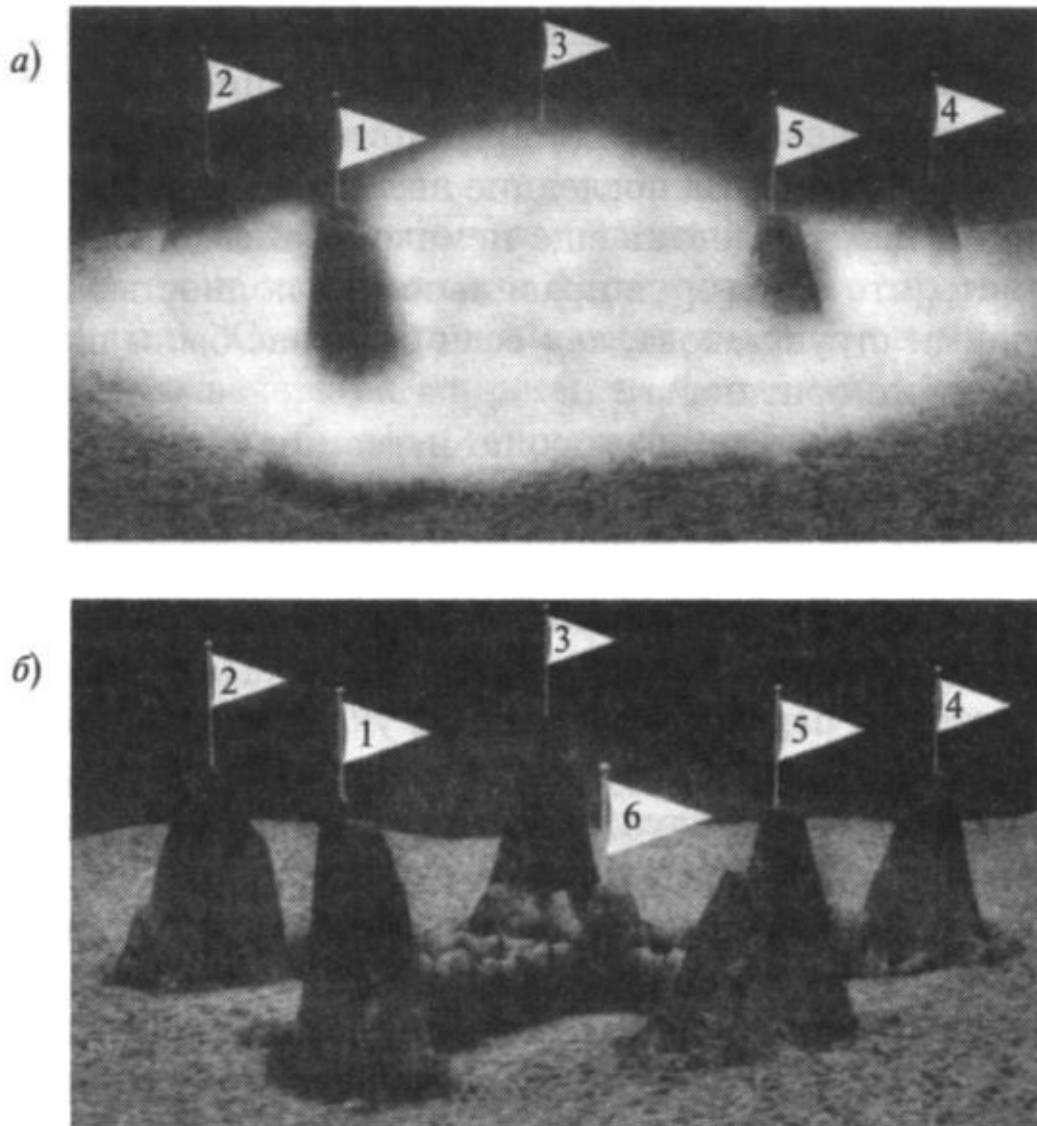


Рис. 13.1. (а) Схематическое представление пяти теорий струн до 1995 г. (б) Схематическое представление метаобъединения, вскрытого М-теорией. 1 — О-гетеротические; 2 — Тип I; 3 — Тип IIB; 4 — Тип IIA; 5 — Е-гетеротические; 6 — М-теория

Мощь перевода

Хотя рис. 13.1 схематически передаёт суть открытия Виттена, но при взгляде на этот рисунок может возникнуть недоумение, что же особенного в этом открытии. До достижения Виттена исследователи думали, что

существует пять разных версий теории струн; после этого достижения они перестали так думать. Но если вы никогда не знали о пяти предположительно разных теориях струн, то почему вы должны удивляться тому, что самый умный струнный теоретик показал, что они вовсе не разные? Иными словами, почему открытие Виттена столь революционно и не является всего лишь простой корректировкой бытовавшего ранее неверного понимания?

А вот почему. В течение нескольких последних десятилетий струнные теоретики постоянно сталкивались с одной математической проблемой. Из-за того, что вывести точные уравнения любой из пяти теорий струн, а затем анализировать их, оказалось очень трудным делом, исследования в основном базировались на приближённых уравнениях, с которыми работать гораздо проще. Хотя есть веские основания считать, что во многих случаях приближённые уравнения должны давать ответы, близкие к решениям точных уравнений, но всё же приближения, как и переводы, всегда что-то упускают. По этой причине определённые ключевые проблемы оказываются вне досягаемости математики приближённых уравнений, что существенно мешает прогрессу.

Для борьбы с неточностями, присущими переводу текста, читатель имеет пару простых средств. Если лингвистические познания читателя достаточны, то самое лучшее — это обратиться к оригинальному тексту. Но в настоящий момент такой вариант для струнных теоретиков недоступен. Благодаря «словарю», разработанному Виттеном и другими теоретиками, у нас есть сильные свидетельства того, что все пять теорий струн являются различными описаниями единой основной теории, М-теории, но исследователям ещё предстоит выработать полное понимание этой связи теорий. За последние несколько лет мы многое узнали о М-теории, но нам предстоит ещё немало пройти, прежде чем кто-то сможет заявить, что эта теория правильно или полностью понята. Ситуация с теориями струн такова, как если бы у нас были пять переводов ещё не найденного оригинала.

Другое полезное средство, хорошо известное читателям переводов, которые либо не имеют оригинального текста (как в случае с теорией струн), либо, что чаще, не понимают языка, на котором он написан, состоит в том, чтобы сверить несколько переводов на известные им языки. Отрывки, в которых переводы сходятся, вызывают доверие; те же отрывки, в которых переводы расходятся, указывают на возможные неточности или разночтения. Именно таким путём Виттен установил, что все пять теорий струн являются различными переводами одной и той же основной теории.

В действительности, его открытие дало чрезвычайно мощный теоретический инструмент, который проще всего понять путём расширения аналогии с лингвистическими переводами.

Представьте себе, что оригинальная рукопись начинена столь тонкой игрой слов, рифм, иносказаний и национально-окрашенных шуток, что целиком текст невозможно изящно перевести ни на один из пяти предложенных языков. Некоторые отрывки можно легко перевести на язык суахили, тогда как прочие отрывки совершенно не подходят для выражения на этом языке. Зато часть прочих отрывков хорошо передаётся на языке инуитов, и ещё часть прекрасно звучит на санскрите. Однако остаются и отрывки, совершенно не поддающиеся переводу ни на один из языков, и тогда никак не обойтись без оригинального текста. Примерно такая ситуация и с пятью теориями струн. Теоретики обнаружили, что по определённым вопросам одна из пяти теорий может давать прозрачное описание физической картины, тогда как описания остальных четырёх теорий слишком сложны в математическом отношении. И в этом состоит сила открытия Виттена. До этого теоретического прорыва теоретики могли упереться в невероятную сложность решения выведенных уравнений. Но работа Виттена показала, что каждый такой вопрос допускает четыре перевода на язык математики — четыре математические переформулировки — и порой на один из переформулированных вопросов ответить гораздо проще. Таким образом, *словарь для перевода между пятью теориями может иногда переводить невероятно трудные вопросы в сравнительно простые.*

Но это не панацея. Подобно тому как все пять переводов некоторых отрывков оригинального текста могут быть одинаково непонятными, так и математические описания проблемы, даваемые всеми пятью теориями, иногда понять одинаково трудно. В таких случаях для дальнейшего продвижения нам нужно полное понимание ускользающей М-теории (подобно обращению к оригинальному тексту). Но, несмотря на это, в огромном числе случаев словарь Виттена даёт мощный новый инструмент для анализа теории струн.

Следовательно, подобно тому как каждый перевод сложного текста служит важной цели, так и каждая формулировка теории струн играет свою важную роль. Сочетая точки зрения каждой теории, мы обретаем возможность отвечать на вопросы, непосильные каждой из теорий в отдельности. Таким образом, открытие Виттена упятерило силы теоретиков, развивающих теорию струн. Вот почему, в значительной части, оно вызвало настоящую революцию в теории струн.

Одиннадцать измерений

Итак, какие достижения последовали благодаря вновь обрётённой силе анализировать теорию струн? Их было множество. Я сосредоточусь только на тех, которые больше всего повлияли на проблему пространства и времени.

Прежде всего, работа Виттена вскрыла, что в приближённых уравнениях, использовавшихся в 1970–1980-х гг. и приводивших к выводу, что Вселенная должна иметь девять пространственных измерений, *упускалось одно пространственное измерение*. Точный анализ Виттена показал, что согласно М-теории Вселенная имеет десять пространственных измерений, т. е. одиннадцать измерений пространства-времени. Подобно тому как Калуца открыл, что пять измерений пространства-времени давали основание для объединения электромагнетизма и гравитации, и подобно тому как теоретики обнаружили, что десять измерений пространства-времени достаточно для объединения квантовой механики и общей теории относительности, так и Виттен открыл, что во Вселенной с одиннадцатью измерениями пространства-времени можно объединить все теории струн. Можно привести такую аналогию: пять селений с уровня земли кажутся совершенно отдельными друг от друга, но если взглянуть на них с вершины горы и тем самым задействовать дополнительное, вертикальное, измерение, то будет видно, что все селения соединены между собой сетью тропинок. Дополнительное пространственное измерение, появившееся из анализа Виттена, сыграло столь же важную роль при установлении связей между всеми пятью теориями струн.

Хотя открытие Виттена определённо следует исторически сложившейся схеме достижения единства за счёт добавления измерения, но его результат потряс все основания, когда он объявил о нём на ежегодной международной конференции по теории струн. Исследователи, включая меня, долго и много работали над приближёнными уравнениями, и все были уверены, что число пространственных измерений установлено правильно. Но Виттен обнаружил нечто совершенно поразительное.

Он показал, что во всех предыдущих работах допускалось одно математическое упрощение, равносильное *предположению*, что ранее необнаруженное десятое пространственное измерение чрезвычайно мало, гораздо мельче остальных. Оно в действительности столь мало, что у приближённых уравнений теории струн не хватало сил обнаружить даже намёк на существование десятого измерения. Но на базе новых

представлений объединяющей М-теории Виттен смог выйти за рамки приближённых уравнений, провести более тонкий анализ и показать, что одно пространственное измерение всегда упускалось. Таким образом, Виттен показал, что пять десятимерных конструкций, развивавшихся в теории струн на протяжении более чем десятилетия, были в действительности пятью приближёнными описаниями единой одиннадцатимерной теории.

Можно задаться вопросом, перечеркнуло ли это неожиданное открытие предыдущую работу в теории струн. В общем и целом, не перечеркнуло. Открытое десятое пространственное измерение добавило непредвиденное свойство теории, но если теория струн / М-теория верна, и если десятое пространственное измерение действительно гораздо меньше остальных (что неявно предполагалось долгое время), то предыдущая работа имеет законное основание. Однако, поскольку в рамках известных уравнений всё ещё не удаётся ухватить размеры или формы дополнительных измерений, то в последние несколько лет струнные теоретики приложили немало усилий к исследованию новой возможности не столь малого десятого измерения. Помимо прочего, широкомасштабные результаты этих исследований подвели прочное математическое основание под схематическую иллюстрацию объединяющей силы М-теории (рис. 13.1).

Я подозреваю, что переход от десяти к одиннадцати измерениям не сильно сказался на вашем представлении о теории (несмотря на значимость этого перехода для математической структуры теории струн / М-теории). Для всех, за исключением знатоков, попытка представить семь свёрнутых измерений не сильно отличается от попытки представить шесть измерений.

Но второе и тесно связанное с первым следствие второй суперструнной революции действительно меняет интуитивно представляемую картину теории струн. В коллективной работе ряда исследователей — Виттена, Даффа, Халла, Таунсенда и многих других — было установлено, что *теория струн — это теория не только струн*.

Браны

В предыдущей главе у вас мог возникнуть естественный вопрос: *почему именно струны?* Что такого особенного в одномерных структурах? Мы установили, что для примирения квантовой механики с общей теорией относительности решающим является тот факт, что струны — не точки, что

они имеют ненулевой размер. Но этому требованию можно удовлетворить с помощью двумерных объектов, таких как миниатюрные диски или мембраны, или с помощью трёхмерных образований, подобных мячам или комкам глины. На эту роль сгодятся объекты и более высокой размерности, поскольку теория изобилует пространственными измерениями. Почему такие объекты не играют никакой роли в наших фундаментальных теориях?

В конце 1980-х — начале 1990-х гг. казалось, что у теоретиков есть убедительный ответ. Они говорили, что уже *предпринимались* попытки сформулировать фундаментальную теорию на основе каплеподобных объектов; среди прочих это пытались сделать такие выдающиеся физики XX в., как Вернер Гейзенберг и Поль Дирак. Но их работа, как и последующие исследования, показала, что на базе каплеподобных объектов чрезвычайно трудно разработать теорию, которая удовлетворяла бы самым основным физическим требованиям — например, гарантировала бы, чтобы все квантово-механические вероятности лежали в диапазоне от 0 до 1 (отрицательные вероятности или вероятности, превышающие 1, не имеют никакого смысла), и не допускала бы передачу информации со скоростью, превышающей скорость света. Полвека исследований, начатых в 1920-х гг., показали, что этим условиям можно удовлетворить в рамках представлений о точечных частицах (пока игнорируется гравитация). А в 1980-х гг., после более чем десятилетия исследований Шварца, Шерка, Грина и других теоретиков, к удивлению большинства физиков было установлено, что этим же условиям можно удовлетворить, взяв в качестве элементарных составляющих одномерные объекты — струны (и обязательно *включив* гравитацию). Но казалось невозможным использовать в качестве элементарных составляющих объекты с двумя или более пространственными измерениями. Коротко говоря, дело в том, что число симметрий, допускаемых уравнениями, невероятно возрастает для одномерных объектов (струн), а затем резко падает с увеличением количества измерений. Обсуждаемые симметрии носят более абстрактный характер, чем те, что обсуждались в главе 8 (они имеют отношение к тому, как меняются уравнения, когда при изучении движения струны или объекта более высокой размерности мы увеличиваем или уменьшаем его размер, тем самым неожиданно и произвольно меняя степень разрешения наших наблюдений). Эти преобразования критически важны для формулировки физически осмысленной системы уравнений, и казалось, что требуемое изобилие терялось при переходе к двумерным объектам и объектам более высокой размерности. ^[172]

Большинство теоретиков, работающих в области теории струн, пережили ещё один шок, когда работа Виттена и лавина последовавших за ней результатов^{173} привели к осознанию того, что теория струн и границы М-теории, в которые она вписалась, действительно содержит некоторые объекты помимо струн. Анализ показал, что имеются двумерные объекты, естественным образом названные *мембранами* (отсюда и ещё одно возможное толкование буквы «М» в названии М-теории) или, ради систематизации, *2-бранами*. Допустимы и трёхмерные объекты, названные, соответственно, *3-бранами*. Анализ также показал, что существуют и объекты с p пространственными измерениями (хотя их и трудно себе представить), где p может быть любым целым числом, меньшим 10, — они, соответственно, получили название *p -бран*. Таким образом, струны являются лишь одним из возможных элементарных объектов теории струн, но не *единственным* объектом.

Прочие объекты ранее ускользали от теоретических исследований во многом по той же причине, что и десятое измерение: приближённые уравнения теории струн слишком грубы, чтобы ухватить их. Теоретический анализ показал, что p -браны должны быть существенно тяжелее струн. А чем массивнее объект, тем больше требуется энергии, чтобы его создать. При крайне высоких энергиях, характерных для p -бран, приближённые уравнения становятся столь неточными, что не могут обнаружить браны, которые остаются в тени, — вот почему браны не удавалось заметить целыми десятилетиями. Но благодаря различным переформулировкам и новым подходам, предоставленным объединяющей концепцией М-теории, исследователи смогли обойти некоторые из технических препятствий и теперь, чисто математическим путём, открыли всё богатство объектов с более высокой размерностью.^{174}

Открытие других объектов в теории струн умаляет или принижает более раннюю работу не в большей степени, чем открытие десятого пространственного измерения. Исследование показывает, что если браны высокой размерности существенно тяжелее струн — как неявно предполагалось в более ранних работах, — то они оказывают минимальное влияние на широкий круг теоретических расчётов. Но подобно тому как десятое измерение не обязательно должно быть гораздо меньше остальных, так и браны высокой размерности не обязательно должны быть значительно тяжелее струн. Существуют разнообразные условия, пока гипотетические, при которых масса браны высокой размерности может оказаться сравнимой с массой самых лёгких колебательных мод струны, и

тогда брана действительно значительно влияет на получаемую физику. Например, в нашей работе в соавторстве с Эндрю Строминджером и Дэвидом Моррисоном показано, что брана может обёртываться вокруг сферического куска многообразия Калаби–Яу подобно вакуумной упаковке вокруг грейпфрута; если эта часть пространства сожмётся, то сожмётся и брана, что приведёт к уменьшению её массы. Мы смогли показать, что это уменьшение массы позволит этой части многообразия полностью сжаться и разорваться (само пространство может разорваться), однако обёрнутая вокруг этой области пространства брана будет гарантировать, что не произойдёт никаких катастрофических физических последствий. Я детально обсуждал этот вопрос в «Элегантной Вселенной», и мы вернёмся к нему в главе 15 при обсуждении путешествия во времени, так что сейчас мы не будем больше останавливаться на этом. Но этот пример ясно показывает, как браны высокой размерности могут существенно влиять на физику теории струн.

Есть, однако, и другой способ, каким браны влияют на представление о Вселенной в соответствии с теорией струн / М-теорией. Само космическое пространство — всё пространство-время, которое мы знаем, — может быть не чем иным, как грандиознойбраной. Наш мир может быть миром на бране.

Миры на бранах

Проверка теории струн — очень непростое дело, поскольку струны ничтожно малы. Но вспомним, как физика определяет размер струн. Частица — переносчик гравитации (гравитон) отвечает моде колебания струны из числа мод с наименьшей энергией, а сила переносимого ею гравитационного взаимодействия пропорциональна длине струны. Поскольку гравитационное взаимодействие очень слабо, то и струна должна быть чрезвычайно короткой; расчёты показывают, что длина струны должна быть не более сотни планковских длин или около того, чтобы колебательная мода струны-гравитона обеспечивала наблюдаемую величину гравитационной силы.

Из этого разъяснения видно, что высокоэнергетические струны не обязательно должны быть чрезвычайно малыми, поскольку они не имеют прямой связи с гравитоном (гравитон является *низкоэнергетической* колебательной модой с нулевой массой). В действительности, по мере увеличения энергии струны она поначалу колеблется всё интенсивнее, но

при переходе через определённый энергетический порог дальнейшее повышение энергии приводит к другому эффекту: длина струны начинает неограниченно расти. При закачивании в струну достаточного количества энергии она может вырасти до макроскопических размеров. Современные технологии не позволяют вкачать в струну столь много энергии, но вполне возможно, что такие струны рождались в сверхгорячей гиперэнергетической Вселенной сразу после Большого взрыва. Если некоторые из этих струн дожили до сегодняшнего дня, то они вполне могли бы сейчас простираться где-то в небесах. Хотя это и смелое предположение, но возможно даже, что такие длинные струны могли бы оставить крохотные, но обнаружимые следы в тех данных, которые мы получаем из космоса, так что не исключена возможность, что теория струн будет когда-нибудь подтверждена с помощью астрономических наблюдений.

Браны большой размерности, p -браны, тоже не обязательно должны быть ничтожно малыми, а поскольку у них больше измерений, чем у струны, то открывается принципиально новая возможность. Когда мы представляем длинную — возможно, бесконечно длинную — струну, мы воображаем длинный одномерный объект, существующий в трёхмерном пространстве нашей повседневной жизни. Линия электропередачи, простирающаяся настолько, насколько может увидеть глаз, — адекватный образ. Аналогично, если мы воображаем большую — возможно, бесконечно протяжённую в обоих направлениях — 2-брану, мы воображаем двумерную поверхность, существующую в трёхмерном пространстве, хорошо известном нам по повседневному опыту. Я не знаю реалистической аналогии, но сверхъестественно огромный экран летнего кинотеатра — чрезвычайно тонкий, но широкий и высокий, насколько видит глаз, — даёт достаточно хороший визуальный образ. Но когда дело доходит до 3-браны, мы оказываемся в совершенно иной ситуации. У 3-браны три измерения, так что будь она большой — возможно, бесконечно протяжённой во всех трёх направлениях — она бы *заполнила* все три пространственных измерения. Тогда как 1-брана и 2-брана, подобно линии электропередачи и экрану кинотеатра, являются объектами, существующими *внутри* наших трёх пространственных измерений, 3-брана заняла бы всё известное нам пространство.

Отсюда возникает интригующая возможность. Не живём ли мы сами внутри 3-браны? Не уподобляемся ли мы Белоснежке, чей мир ограничивается двумерным экраном — 2-браной, которая сама пребывает внутри трёхмерной Вселенной (внутри трёх пространственных измерений

кинотеатра)? Не может ли быть так, что всё известное нам существует внутри трёхмерного экрана — 3-браны, которая сама пребывает внутри Вселенной более высокой размерности, описываемой теорией струн / М-теорией? Не может ли оказаться так, что то, что Ньютон, Лейбниц, Мах и Эйнштейн называли трёхмерным пространством, является на самом деле особой трёхмерной сущностью теории струн / М-теории? Или, переходя на язык теории относительности, не может ли быть так, что четырёхмерное пространство-время, разработанное Минковским и Эйнштейном, является на самом деле следом или траекторией 3-браны, разворачивающейся во времени? Короче говоря, не может ли известная нам Вселенная быть браной?^{175}

Возможность того, то мы живём внутри 3-браны (так называемый *сценарий мира на бране*), является самым последним поворотом теории струн / М-теории. Как мы увидим, она открывает совершенно новый взгляд на теорию струн / М-теорию с многочисленными и далеко идущими последствиями. Суть дела в том, что браны во многом подобны космической «липучке»; определённым образом, который мы сейчас обсудим, они очень липкие.

Липкие браны и колеблющиеся струны

Один из мотивов введения термина «М-теория» состоит в том, что, как мы теперь видим, название «теория струн» подчёркивает лишь один из множества объектов теории. Одномерные струны были обнаружены в теоретических исследованиях за десятилетия до того, как более тонкий анализ обнаружил существование бран более высокой размерности, так что «теория струн» — в чём-то устаревшее название. Однако, хотя М-теория и устанавливает своего рода «демократию» среди многообразия объектов различной размерности, но струны всё же играют главную роль в нашей современной формулировке. Одна из причин сразу же ясна. Можно игнорировать все p -браны более высокой размерности в ситуации, когда они гораздо тяжелее струн, — так исследователи неосознанно и поступали с 1970-х гг. Но есть и ещё одна причина, носящая более общий характер и делающая струны «первыми среди равных».

В 1995 г., вскоре после того как Виттен объявил о своём открытии, Джозеф Польчински из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре получил богатую пищу для размышлений. Несколькими годами ранее в статье, написанной совместно с Робертом Леем и Джином Даем,

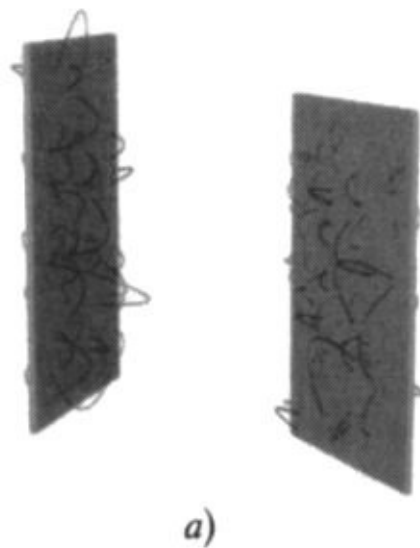
Польчински обнародовал интересное и загадочное свойство теории струн. Мотивировки и рассуждения Польчински были несколько техническими, но детали для нас не важны, а результаты таковы. Он обнаружил, что в определённых ситуациях концы открытых струн (напомним, что такие струны представляют собой отрезки с двумя свободными концами) не могут двигаться как им угодно. Подобно тому как бусинка на проволочке может свободно двигаться, но при своём движении вынуждена повторять контур проволоки, и подобно тому как пинбольный шарик свободен в своём движении, но должен повторять контуры поверхности пинбольного стола, так и концы незамкнутой струны могут свободно двигаться, но ограничены в своём движении определёнными формами или контурами в пространстве. Польчински с соавторами показал, что хотя струна всё ещё вольна колебаться, но её концы будут «приклеены» к определённым областям или «захвачены» ими.

В одних ситуациях эта область может быть одномерной, и тогда концы струны уподобляются двум бусинкам, скользящим по проволоке, а сама струна — ниточке, связывающей их. В других ситуациях эта область может быть двумерной, и тогда концы струны уподобляются двум пинбольным мячам, связанным одной нитью и катающимся по пинбольному столу. Ещё в других ситуациях область может иметь три, четыре или любое число пространственных измерений не выше девяти. Эти результаты, как показал Польчински, а также Пётр Хоржава и Майкл Грин, помогли решить давнюю загадку, возникающую при сравнении замкнутых и незамкнутых струн, но в течение ряда лет эта работа привлекала мало внимания.^{[\[176\]](#)} Всё изменилось в октябре 1995 г., когда Польчински закончил пересмотр этих ранних результатов в свете новых открытий Виттена.

Работа Польчински оставляла без ответа следующий вопрос, который, возможно, возник у вас при чтении предыдущего абзаца: если концы незамкнутых струн удерживаются внутри определённой области пространства, то *к чему же они приклеены?* Проволока и пинбольный стол существуют сами по себе, независимо от бусинок или шариков, движение которых они ограничивают. Что это за области пространства, к которым привязаны концы незамкнутых струн? Заполнены ли они неким независимым и фундаментальным ингредиентом теории струн, который так ревностно удерживает концы незамкнутой струны? До 1995 г., когда единственными объектами теории струн были только струны, не виделось подходящего кандидата на эту роль. Но после открытия Виттена и шквала последовавших работ ответ стал очевиден Польчински: если концы незамкнутых струн обязаны находиться внутри некой p -мерной области

пространства, то эта область должна заниматься p -браной^[81]. Его расчёты показали, что вновь открытые p -браны в точности обладают свойствами объектов, неумолимо захватывающих концы открытых струн, вынуждая их двигаться в пределах p -мерной области пространства, занимаемой браной.

Чтобы получить более ясное представление, взглянем на рис. 13.2. На рис. 13.2а мы видим пару 2-бран с массой движущихся колеблющихся струн, концы которых ограничены в своём движении этими бранами. Ситуация с бранами более высокой размерности совершенно идентична, хотя её труднее изобразить. Концы открытых струн могут свободно двигаться по p -бранам и внутри них, но они не могут покинуть саму брану. Когда речь заходит о возможности движения вне браны, то браны оборачиваются самой клейкой вещью, какую только себе можно представить. Возможно также, что один конец открытой струны захвачен одной p -браной, а другой конец — другой p -браной, которая может иметь либо ту же самую размерность, что и первая (рис. 13.2б), либо другую (рис. 13.2в).



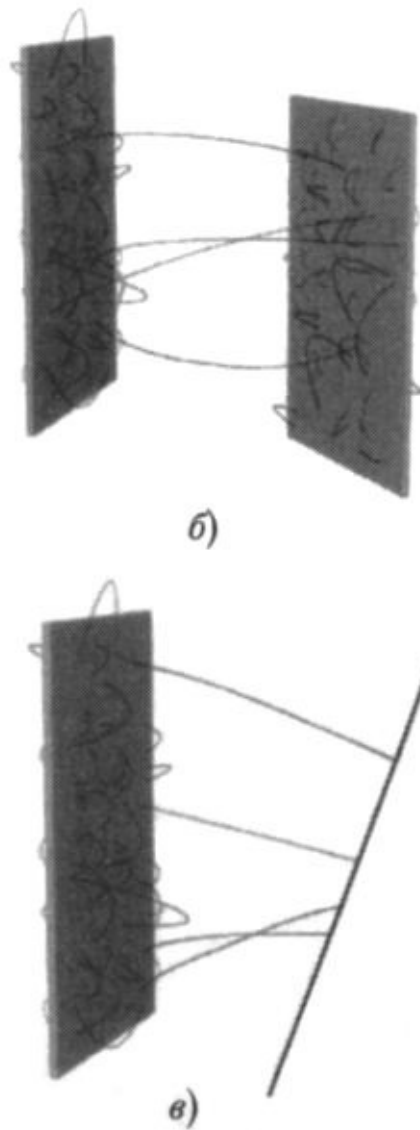


Рис. 13.2. (a) Открытые струны, с концами, прикреплёнными к двумерным бранам (2-бранам). (б) Струны, соединяющие две разные 2-браны. (в) Струны, соединяющие 2-брану и 1-брану

Работа Польчински как нельзя кстати подошла к открытию Виттена, вызвавшему вторую революцию в теории суперструн. В то время как некоторые из величайших умов в теоретической физике XX в. тщетно пытались сформулировать теорию, содержащую фундаментальные объекты с большим числом измерений, чем точки (нульмерные) или струны (одномерные), результаты Виттена и Польчински, дополненные важными достижениями множества современных ведущих исследователей, открыли путь к прогрессу в этом направлении. Эти физики не только установили,

что теория струн / М-теория содержит объекты более высокой размерности, но результаты Польчински, в частности, дали средства для теоретического анализа их детальных физических свойств (если будет доказано их существование). Польчински показал, что свойства браны определяются в значительной степени свойствами открытых колеблющихся струн, концы которых она захватывает. Подобно тому как вы многое можете узнать о ковре, проведя рукой по его ворсу — шерстяным нитям, прикреплённым к подложке ковра, — так и многие свойства браны можно выяснить, изучая струны, концы которых она держит.

Это великолепный результат. Он показывает, что десятилетия исследований, которые привели к разработке тонких математических методов для изучения одномерных объектов (струн), могут использоваться для изучения объектов более высокой размерности, p -бран. Замечательно то, что Польчински обнаружил: анализ объектов более высокой размерности сводится в значительной степени к очень знакомому, хотя всё ещё гипотетическому, анализу струн. Именно в этом смысле струны выделяются среди равных. Если вы понимаете поведение струн, то вы уже прошли большой путь к пониманию поведения p -бран.

Имея в виду всё это, давайте теперь вернёмся к сценарию мира на бране — возможности, что все мы живём в пределах 3-браны.

Наша Вселенная как брана

Если мы живём внутри 3-браны — если наше четырёхмерное пространство-время является не чем иным, как историей 3-браны во времени, — то сакраментальный вопрос, является ли пространство-время чем-то сущим, предстаёт в совершенно ином свете. Известное нам пространство-время может появиться из реальной физической сущности теории струн / М-теории — 3-браны, а не из некой смутной или абстрактной идеи. В этом подходе реальность нашего четырёхмерного пространства будет на равных с реальностью электрона или кварка. (Конечно, можно ещё задаться вопросом, является ли сущностью само более крупное пространство-время, в котором существуют струны и браны — одиннадцать измерений теории струн / М-теории; тем не менее реальность арены пространства-времени, которую мы непосредственно окружаем, будет очевидной.) Но если Вселенная, которую мы осознаём, на самом деле является 3-браной, то не может ли даже поверхностный взгляд обнаружить, что мы во что-то погружены — а именно, во внутренность 3-

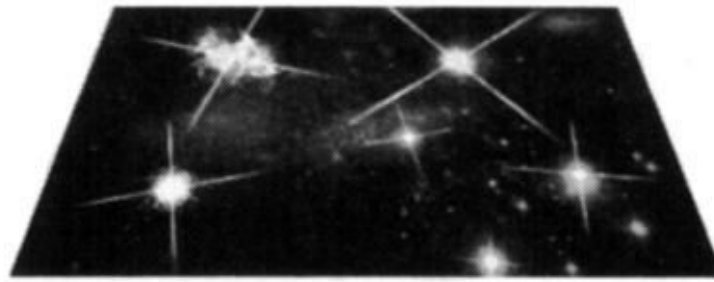
браны?

Что же, мы уже осведомлены о том, во что мы можем быть погружены по предположению современной физики, — в океан Хиггса, в пространство, заполненное тёмной энергией, в мириады флуктуаций квантового поля — и ни одна из этих сущностей непосредственно не воспринимается человеком. Так что не должно вызвать потрясение то, что теория струн / М-теория добавляет ещё одного кандидата в список невидимых сущностей, которые могут заполнять «пустое» пространство. Но не будем спешить в выводах. Мы понимаем воздействие на физику каждой из предыдущих возможностей, а также то, как мы могли бы установить, действительно ли они существуют. В самом деле, мы видели, что уже собраны веские доказательства в пользу существования тёмной энергии и квантовых флуктуаций; доказательство существования поля Хиггса ищется на современных ускорителях и планируется продолжать поиски на будущих ускорителях элементарных частиц. А какова ситуация с 3-браной? Если верен сценарий мира на бране, то почему мы не видим эту 3-брану, и как нам установить, существует ли она на самом деле?

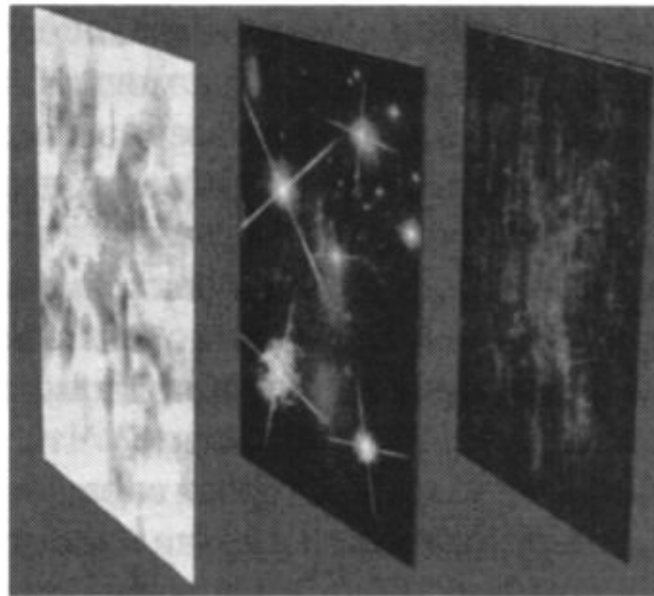
Ответ на этот вопрос показывает, насколько радикально отличаются физические результаты теории струн / М-теории в контексте мира на бране от предшествующих «безбранных» сценариев. В качестве важного примера рассмотрим движение света — движение фотонов. Как вы знаете, в теории струн фотон представляет собой одну из колебательных мод струны. Но математические исследования показали, что в сценарии мира на бране фотоны связаны только с колебаниями открытых струн, замкнутые струны не имеют отношения к фотонам, и это имеет важные следствия. Концы открытых струн могут двигаться как угодно, но только в пределах 3-браны. Это значит, что фотоны (открытые струны с колебательной модой фотонов) могут беспрепятственно путешествовать по всей нашей 3-бране, из-за чего брана становится *совершенно прозрачной (полностью невидимой)*, и это не даёт нам возможности увидеть, что мы погружены в неё.

Не менее важно и то, что концы открытых струн не могут покинуть брану, т. е. они не могут двигаться по дополнительным измерениям. Подобно тому как проволока ограничивает движение нанизанных на неё бусинок или пинбольный стол сдерживает свои шарики, наша липкая 3-брана разрешает фотонам двигаться *только* в пределах наших трёх пространственных измерений. Поскольку фотоны являются частицами — переносчиками электромагнитного взаимодействия, то это значит, что электромагнитная сила — свет — замкнута в пределах наших трёх измерений, как показано на рис. 13.3 (на примере двумерного

пространства).



а)



б)

Рис. 13.3. (а) В сценарии мира на бране фотоны являются открытыми струнами, концы которых заперты внутри браны, так что фотоны не могут покинуть саму брану. (б) Наш мир на бране мог бы плавать в великом просторе дополнительных измерений, остающихся невидимыми для нас, поскольку видимый нами свет не может покинуть нашу брану. Могли бы существовать и другие миры на бранах, плывущие рядом с нами

Это очень сильное утверждение с важными последствиями. Ранее мы требовали, чтобы дополнительные измерения теории струн / М-теории были бы компактно свёрнуты. Ясно, что причина этого требования состоит в том, что раз мы не видим дополнительные измерения, то они должны быть от нас скрыты. А один из способов скрыть их — сделать их настолько

малыми, что ни мы, ни наше оборудование не будет в состоянии обнаружить их. Но давайте теперь посмотрим на эту проблему в рамках сценария мира на бране. Как мы обнаруживаем объекты? Когда мы смотрим глазами, мы используем электромагнитное взаимодействие; когда мы применяем мощные инструменты, подобные электронным микроскопам, мы также используем электромагнитное взаимодействие; когда мы берём на вооружение ускорители элементарных частиц, то одной из сил, позволяющих нам заглянуть в микромир, опять же является электромагнитная сила. Но если электромагнитное взаимодействие ограничено нашей 3-браной, нашими тремя измерениями, то с помощью него никак *невозможно* «пощупать» дополнительные измерения, независимо от их размера. Фотоны не могут вырваться из наших трёх измерений, войти в дополнительные измерения, а затем вернуться к нашим глазам или к нашему оборудованию, позволяя обнаружить дополнительные измерения — *даже если бы они были столь же большими, как известные нам измерения нашего пространства.*

Так что если мы живём в 3-бране, то есть и альтернативное объяснение того, почему мы ничего не знаем о дополнительных измерениях. Требование, чтобы дополнительные измерения были чрезвычайно малы, необязательно. Они могут быть и большими. Мы не видим их из-за *способа*, которым смотрим. Мы смотрим посредством электромагнитной силы, которая не в состоянии добраться до любых измерений, помимо трёх известных нам. Подобно муравью, бродящему по плавающему листу лилии, совершенно не ведающему о глубоких водах прямо под видимой поверхностью листа, мы могли бы плавать внутри громадного пространства более высокой размерности, как на рис. 13.3б, но электромагнитная сила — навечно запертая в пределах наших измерений — не может открыть нам это.

Хорошо, но ведь электромагнитное взаимодействие является лишь одним из четырёх взаимодействий природы. Как насчёт остальных трёх? Могут ли они внедриться в дополнительные измерения и позволить нам вскрыть их существование? Что касается сильного и слабого ядерного взаимодействия, то ответ снова отрицательный. Расчёты показывают, что в сценарии мира на бране частицы — переносчики этих взаимодействий (глюоны и W- и Z-частицы) также возникают из колебательных мод открытых струн, так что они тоже заперты, как и фотоны, в трёх наших измерениях, и процессы, включающие сильное и слабое ядерное взаимодействие, столь же слепы по отношению к дополнительным измерениям. То же самое относится и к частицам материи. Электроны,

кварки и все прочие типы частиц также возникают из колебаний открытых струн с пойманными концами. *Таким образом, в сценарии мира на бране вы и я, а также всё, что мы когда-либо видели, навечно заключены в пределах нашей 3-браны.* Учитывая время, можно сказать, что всё заключено в пределах нашего четырёхмерного среза пространства-времени.

Это почти всё, но только почти. С гравитационным взаимодействием ситуация совсем другая. Математический анализ в рамках сценария мира на бране показывает, что гравитоны возникают из колебательных мод замкнутых струн, как это было и в ранее обсуждавшихся сценариях «безбранного мира». А замкнутые струны — струны, не имеющие концов, — не ограничены бранами. Они могут столь же свободно покинуть брану, как и путешествовать по ней или через неё. Так что если бы мы жили на бране, то не были бы полностью отрезаны от дополнительных измерений. Посредством гравитационной силы мы могли бы взаимодействовать с дополнительными измерениями. В этом сценарии гравитация была бы нашим единственным способом выхода за пределы наших трёх пространственных измерений.

Сколь большими должны быть дополнительные измерения, чтобы мы начали осознавать их посредством гравитационного взаимодействия? Это очень интересный и важный вопрос, так что давайте подробнее остановимся на нём.

Гравитация и большие дополнительные измерения

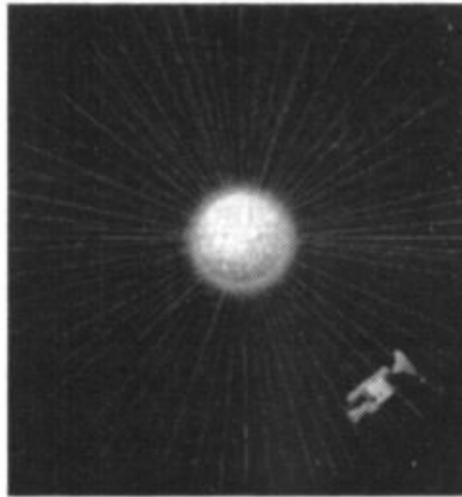
Ещё в 1687 г., формулируя закон всемирного тяготения, Ньютон в действительности сделал сильное утверждение относительно количества пространственных измерений. Ньютон не просто сказал, что сила притяжения между объектами уменьшается по мере увеличения расстояния между ними. Он предложил формулу, *обратную квадратичную зависимость*, точно описывающую, как уменьшается гравитационное притяжение с увеличением расстояния между двумя объектами. Согласно этой формуле, если удвоить расстояние между объектами, то гравитационное притяжение между ними снизится в 4 раза (2^2); если утроить это расстояние, то притяжение уменьшится в 9 раз (3^2); а если учетверить расстояние, то гравитационное притяжение станет слабее в 16 раз (4^2); в общем случае, гравитационная сила падает пропорционально квадрату расстояния между объектами. Как стало совершенно очевидно за последние несколько сотен лет, эта формула прекрасно работает.

Но *почему* сила гравитации подчиняется именно квадратичной зависимости? Почему бы ей не падать пропорционально кубу расстояния (так что с удвоением расстояния сила уменьшалась бы в 8 раз), либо четвёртой степени (так что с удвоением расстояния сила уменьшалась бы в 16 раз), либо, возможно, просто пропорционально расстоянию между объектами (так что с удвоением расстояния сила уменьшалась бы в 2 раза)? Ответ напрямую связан с количеством измерений пространства.

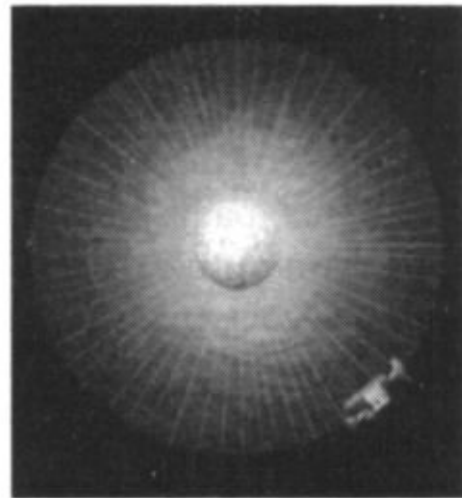
Чтобы это понять, можно, например, думать о количестве гравитонов, испускаемых и поглощаемых объектами в зависимости от расстояния между ними, или о том, насколько кривизна пространства-времени уменьшается по мере увеличения расстояния между объектами. Но мы поступим проще, взяв на вооружение старый подход, который быстро и наглядно приведёт нас к правильному ответу. Посмотрим на рисунок (рис. 13.4*a*), схематически иллюстрирующий гравитационное поле массивного объекта (например, Солнца), во многом подобный рис. 3.1, на котором представлено магнитное поле стержневого магнита. Отметим важное отличие: в то время как силовые линии магнитного поля простираются от северного полюса магнита к его южному полюсу, линии гравитационного поля однородно расходятся во всех направлениях от одной точки, схематически представляющей Солнце. Сила гравитационного притяжения, испытываемого другим объектом (представим себе спутник, вращающийся по орбите вокруг Солнца), будет ощущаться пропорционально плотности линий поля в месте нахождения этого объекта. Чем больше линий поля пронизывают спутник (как на рис. 13.4*б*), тем больше испытываемое им гравитационное притяжение.



a)



а)



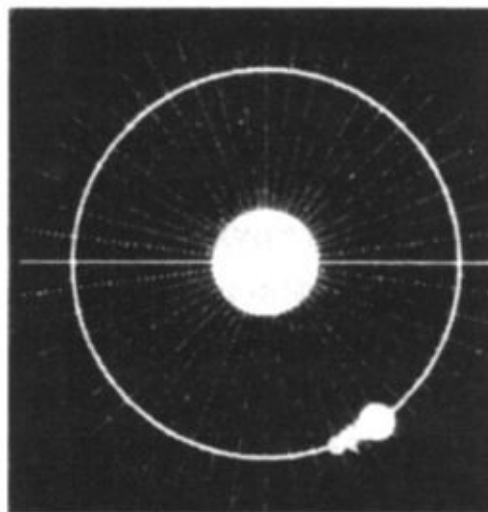
б)

Рис. 13.4. (а) Гравитационное притяжение между двумя объектами, такими как Солнце и спутник, обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Причина кроется в том, что линии гравитационного поля Солнца расходятся однородно во всех направлениях (б) и, следовательно, их плотность на расстоянии d обратно пропорциональна площади воображаемой сферы радиуса d , схематически изображённой на рис. (в), а эта площадь согласно элементарной геометрии пропорциональна d^2

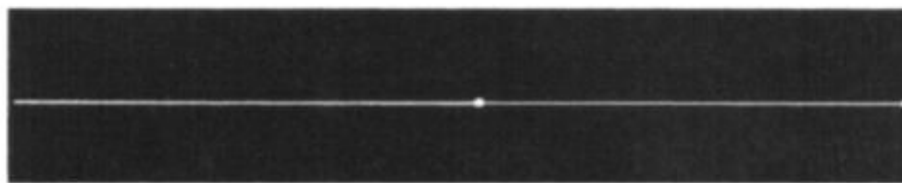
Теперь мы можем объяснить, откуда берётся обратная квадратичная зависимость в законе Ньютона. Воображаемая сфера с центром на Солнце,

проходящая через место нахождения спутника (рис. 13.4в), имеет площадь (подобно площади поверхности любой сферы в трёхмерном пространстве), пропорциональную *квадрату* её радиуса, т. е. *квадрату* расстояния между Солнцем и спутником. Значит, плотность линий гравитационного поля, проходящих через сферу (суммарное количество линий, поделённое на площадь поверхности сферы), уменьшается по закону обратных квадратов с увеличением расстояния между Солнцем и спутником. Если удвоить это расстояние, то одно и то же количество линий поля будет равномерно распределено по сфере, имеющей в четыре раза большую площадь, и, следовательно, гравитационное притяжение уменьшится в 4 раза на этом расстоянии. Таким образом, обратная квадратичная зависимость в законе Ньютона является отражением геометрических свойств сфер в трёхмерном пространстве.

Но если бы Вселенная имела два или даже только одно пространственное измерение, то как изменилась бы формула Ньютона? На рис. 13.5а представлена двумерная версия ситуации с Солнцем и вращающимся спутником. Как видно, линии гравитационного поля Солнца равномерно распределяются по окружности — аналогу сферы в двумерном пространстве. Поскольку длина окружности пропорциональна её радиусу (а не квадрату радиуса), то при удвоении расстояния между Солнцем и спутником плотность линий поля уменьшается в 2 раза (а не в 4 раза), из-за чего сила гравитационного притяжения падает только в 2 раза (а не в 4). Если Вселенная имела бы только два пространственных измерения, то гравитационная сила была бы обратно пропорциональна расстоянию, а не квадрату расстояния.



а)



б)

Рис. 13.5. (а) Во Вселенной только с двумя пространственными измерениями гравитационная сила падает пропорционально расстоянию, поскольку линии гравитационного поля однородно распределяются по окружности, длина которой пропорциональна её радиусу. (б) В одномерной Вселенной у линий гравитационного поля совсем не было бы места для пространственного расхождения, так что гравитационная сила была бы постоянной, независимо от расстояния

Если Вселенная имела бы лишь одно пространственное измерение, как на рис. 13.5б, то закон всемирного тяготения был бы ещё проще. У линий гравитационного поля вообще бы не было места для пространственного расхождения, так что сила гравитации не уменьшалась бы с расстоянием. Если удвоить расстояние между Солнцем и спутником (при условии, что подобные объекты могли бы существовать в такой Вселенной), то спутник будет пронизывать всегда одно и то же количество линий поля и, следовательно, сила гравитации между Солнцем и спутником вообще не изменялась бы.

Ситуация, проиллюстрированная на рис. 13.4 и 13.5, напрямую распространяется на Вселенную с четырьмя, пятью, шестью и более пространственными измерениями, хотя это уже невозможно изобразить. Чем больше пространственных измерений, тем больше места для расхождения линий гравитационного поля. А чем больше места, тем всё более ощутимее падает сила гравитации с увеличением расстояния между объектами. Во Вселенной с четырьмя пространственными измерениями сила гравитации падала бы обратно пропорционально третьей степени расстояния (при удвоении расстояния сила уменьшалась бы в 8 раз); в пяти пространственных измерениях эта сила падала бы обратно пропорционально четвёртой степени расстояния (при удвоении расстояния сила уменьшалась бы в 16 раз); в шести пространственных измерениях эта сила падала бы обратно пропорционально пятой степени расстояния (при удвоении расстояния сила уменьшалась бы в 32 раза); и так далее с

увеличением количества пространственных измерений Вселенной.

Вы могли бы подумать, что успешное объяснение громадного объёма данных с помощью закона обратных квадратов (от движения планет до траекторий комет) подтверждает то, что мы живём во Вселенной с тремя пространственными измерениями. Но такой вывод был бы поспешным. Нам известно, что закон обратных квадратов работает на астрономических масштабах, ^{177} и мы знаем, что он работает на земных масштабах, и это согласуется с тем фактом, что на таких масштабах мы видим три пространственных измерения. Но известно ли нам, что он работает и на более мелких масштабах? Насколько он был проверен в микрокосмосе? Оказывается, эксперименты подтвердили его лишь до десятой доли миллиметра; если два объекта разделяет расстояние, превышающее десятую часть миллиметра, то сила их гравитационного притяжения точно соответствует обратной квадратичной зависимости. Но пока что экспериментаторы наталкиваются на значительные технические трудности при проверке закона всемирного тяготения на более мелких масштабах (это связано со слабостью гравитационного взаимодействия и квантовыми эффектами). Этот вопрос очень важен, поскольку отклонение от закона обратных квадратов явилось бы убедительным сигналом, указывающим на существование дополнительных измерений.

Чтобы наглядно представить это, давайте рассмотрим модельную задачу с меньшим количеством пространственных измерений, что позволит нам легко обрисовать и проанализировать всю картину. Вообразим, что мы живём в одномерной Вселенной, — точнее, мы так думаем, поскольку мы видим только одно пространственное измерение и, кроме того, столетия экспериментальных проверок показали, что сила гравитации не меняется с изменением расстояния между объектами. Также представим, что за все эти столетия закон гравитации был проверен на расстояниях вплоть до десятой доли миллиметра, но не ближе. Для меньших расстояний просто нет экспериментальных данных. Вообразим далее, что на самом деле Вселенная имеет второе, свёрнутое пространственное измерение, так что её форма похожа на туго натянутый канат Филиппа Пети, как представлено на рис. 12.5. Как это скажется на будущих более точных проверках закона гравитационного притяжения? Ответ можно получить, глядя на рис. 13.6. Как только два крохотных объекта окажутся достаточно близко друг к другу (на расстоянии порядка длины окружности свёрнутого измерения), двумерный характер пространства станет непосредственно очевиден, поскольку на этих масштабах у линий гравитационного поля *будет* место для расхождения (рис. 13.6a). На достаточно близком расстоянии сила

гравитации окажется *обратно* пропорциональной расстоянию между объектами, перестав быть постоянной и не зависящей от расстояния.

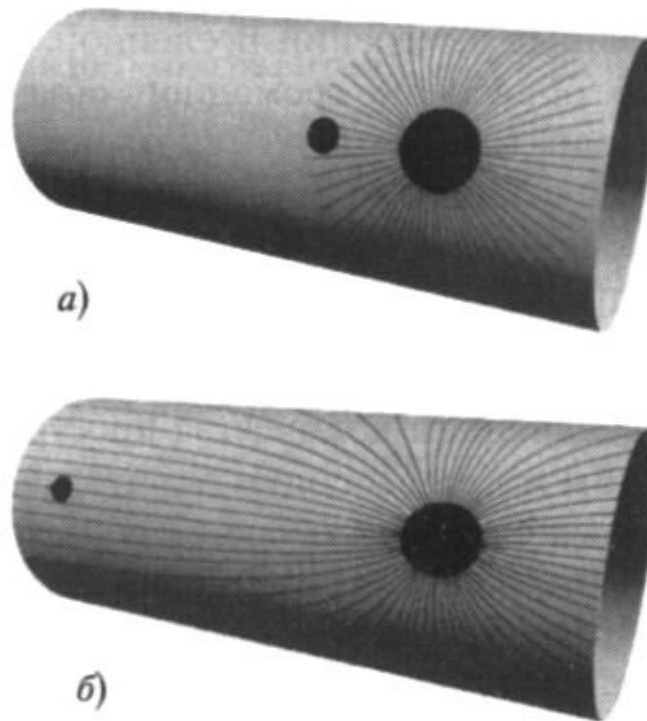


Рис. 13.6. (а) Когда объекты близки, сила гравитации меняется как в двумерном пространстве. (б) На больших расстояниях гравитационное притяжение ведёт себя как в одномерном пространстве — оно постоянно

Таким образом, если бы вы были экспериментатором в этой Вселенной и разработали бы достаточно точные методы измерения гравитационного притяжения, то вот что бы вы обнаружили. Когда два объекта находятся очень близко друг к другу, на расстоянии, гораздо меньшем, чем размер свёрнутого измерения, то их гравитационное притяжение уменьшалось бы пропорционально расстоянию между ними. Но когда расстояние между объектами становится бóльшим, чем длина окружности свёрнутого измерения, то всё бы изменилось. Теперь линиям гравитационного поля просто некуда расходиться. Они бы максимально заполнили второе свёрнутое измерение (можно сказать, они бы «насытили» его), так что начиная с этого расстояния гравитационная сила больше бы не уменьшалась, как проиллюстрировано на рис. 13.6б. Можно сравнить это насыщение с водопроводной системой в старом доме. Представьте, что вы

принимаете душ в ванной комнате этого дома и только что намылили себе голову. И, вот досада, кто-то открывает кран на кухне, и напор воды падает, потому что вода теперь распределяется по двум кранам. Напор уменьшится ещё больше, если кто-то откроет кран в постирочной комнате, поскольку вода побежит и туда. Но как только все водопроводные краны в доме открыты, напор воды перестает падать. Хотя струя воды в душе уже не такая сильная, как вам хотелось бы, но теперь вам нечего бояться — напор воды останется постоянным, так как вода полностью распределилась по всем «дополнительным» кранам. Аналогично, как только гравитационное поле полностью распространилось по дополнительному свёрнутому измерению, сила притяжения перестаёт уменьшаться с увеличением расстояния.

Из таких данных вы могли бы сделать два вывода. Во-первых, тот факт, что гравитационное притяжение двух объектов уменьшается пропорционально расстоянию между ними, когда эти объекты очень близки друг к другу, говорит о том, что Вселенная имеет два измерения, а не одно. Во-вторых, из факта перехода к постоянной силе гравитации — факта, известного по столетиям предыдущих экспериментов, — вы могли бы заключить, что одно из измерений Вселенной свёрнуто, причём размер этого измерения по порядку величины совпадает с расстоянием, на котором происходит переход к постоянной силе. И эти результаты перевернули бы столетнюю, если не тысячелетнюю, веру в то, что казалось таким очевидным, основополагающим и не подлежащим сомнению, — веру в количество пространственных измерений.

Хотя ради простоты я привёл пример Вселенной с меньшим числом измерений, чем в нашей, но ситуация с нашим миром могла бы быть совершенно аналогичной. Столетия экспериментов подтверждают, что сила гравитации изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, и это служит веским основанием, чтобы утверждать, что наш мир трёхмерен. Но до 1998 г. никому не удавалось измерить силу гравитации на расстояниях, меньших миллиметра (к настоящему времени, как уже говорилось, это предел отодвинут до десятой доли миллиметра). Это привело Саваса Димопулоса из Стэнфордского университета, Ниму Аркани-Хамеда (работающего сейчас в Гарвардском университете) и Гия Двали из Университета Нью-Йорка к гипотезе, что *в сценарии мира на бране дополнительные измерения могут достигать миллиметра и всё же оставаться незамеченными*. Эта радикальная гипотеза побудила ряд экспериментальных групп начать изучать гравитацию на субмиллиметровых расстояниях в надежде найти нарушение закона

обратных квадратов, но до сих пор никаких нарушений выявлено не было вплоть до десятой доли миллиметра. Таким образом, основываясь на современных данных, можно сказать, что *если мы живём внутри 3-браны, то дополнительные измерения могут достигать десятой доли миллиметра и всё же оставаться незамеченными нами.*

Таково одно из самых поразительных осмыслений за последнее десятилетие. С помощью трёх негравитационных сил мы можем добраться до расстояний, составляющих миллиардную от миллиардной доли метра (10^{-18} м), и никто не обнаружил никаких следов существования дополнительных измерений. Но в рамках сценария мира на бране с помощью негравитационных сил вообще невозможно найти дополнительные измерения, поскольку эти силы заперты в самой бране. Только гравитация может добраться до дополнительных измерений, и, согласно современным данным, дополнительные измерения могут достигать толщины человеческого волоса и всё же оставаться совершенно невидимыми для самых совершенных наших приборов и инструментов. Прямо сейчас, прямо рядом с вами, прямо рядом со мной, прямо рядом с кем угодно может быть дополнительное пространственное измерение — измерение помимо известных нам направлений влево/вправо, вперёд/назад и вверх/вниз; свёрнутое измерение, однако достаточно крупное, чтобы поглотить нечто с размерами толщины бумажного листа — и это измерение мы никак не можем ухватить. ^[82]

Большие дополнительные измерения и большие струны

Запирая три из четырёх фундаментальных сил, сценарий мира на бране значительно смягчает ограничения на максимально допустимый размер дополнительных измерений, но в рамках этого сценария могут стать большими не только они. Основываясь на более ранних догадках Виттена, Джоя Ликкена, Константина Бачаса и ряда других учёных, Игнатиос Антониадис совместно с Аркани-Хамедом, Димопулосом и Двали поняли, что в рамках сценария мира на бране даже невозбуждённые низкоэнергетические струны могут быть *гораздо* крупнее, чем думали об этом раньше. В действительности, эти два масштаба — размер дополнительных измерений и размер струн — тесно связаны друг с другом.

Вспомним из предыдущей главы, что размер струны определяется требованием, чтобы её колебательная мода, соответствующая гравитону, давала экспериментально измеряемую величину силы гравитационного

взаимодействия. Слабость гравитационного взаимодействия приводит к очень малому размеру струны, порядка планковской длины (10^{-33} см). Но этот вывод в большой степени зависит и от размеров дополнительных измерений. Причина кроется в том, что в рамках теории струн / М-теории сила наблюдаемого нами гравитационного взаимодействия отражает игру двух факторов. Первый фактор — фундаментальная сила самого гравитационного взаимодействия «в чистом виде». Второй фактор — размеры дополнительных измерений. Чем крупнее дополнительные измерения, тем больше гравитации может «утечь» в них и тем слабее сила гравитации *проявляется* в известных нам трёх измерениях. Подобно тому как наблюдаемый нами напор воды падает с открытием дополнительных кранов, поскольку поток воды разделяется на множество труб, так и дополнительные измерения ослабляют наблюдаемую нами силу гравитации, поскольку у гравитации возникает больше «каналов», между которыми она распределяется.

В первоначальных расчётах, определявших длину струны, предполагалось, что дополнительные измерения столь малы (порядка планковской длины), что гравитация вообще не может уходить в них. В таком случае наблюдаемая нами гравитация мала из-за того, что она *действительно* мала. Но теперь, если мы примем сценарий мира на бране и допустим, что дополнительные измерения гораздо крупнее, чем думалось раньше, то наблюдаемая слабость гравитационного взаимодействия больше не означает, что гравитация в самом деле мала. Гравитация уже может быть относительно мощной силой, кажущейся нам слабой лишь из-за того, что большие дополнительные измерения, подобно крупным трубам, уменьшают её исходную силу, проявляющуюся во всех измерениях, а не только в тех трёх, в которых мы живём. Но тогда, раз уж гравитация может быть гораздо более сильной, чем представлялось раньше, то и струны могут быть гораздо длиннее, чем это предполагалось.

В настоящее время вопрос о возможной длине струн не имеет однозначного ответа. Благодаря обрётённой свободе варьировать как размер струн, так и размер дополнительных измерений в гораздо более широком диапазоне, чем это казалось допустимым раньше, появился целый ряд возможностей. Димопулос с сотрудниками показали, что экспериментальные данные из астрофизики и физики элементарных частиц говорят о том, что невозбуждённые струны не могут быть крупнее миллиардной от миллиардной доли метра (10^{-18} м). Хотя по нашим привычным меркам это чрезвычайно малый размер, но он в сто миллионов

миллиардов (10^{17}) раз превосходит планковскую длину — т. е. в *сто миллионов миллиардов раз больше, чем думали раньше*. И как мы сейчас увидим, такого размера уже достаточно, чтобы следы струн могли быть обнаружены на новом поколении ускорителей частиц.

Теория струн сопротивляется экспериментальной проверке?

Возможность того, что мы живём внутри 3-браны, является, конечно, всего лишь возможностью. Как и остаётся только возможностью то, что дополнительные измерения и, следовательно, струны могут быть гораздо крупнее, чем представлялось раньше. *Но это чрезвычайно интригующие возможности*. Конечно, даже если и верен сценарий мира на бране, дополнительные измерения и струны всё ещё могут иметь размеры порядка планковской длины. Но фантастична сама возможность того, что в рамках теории струн / М-теории струны и дополнительные измерения могут быть гораздо более крупными, лишь чуть выходя за пределы достижимого современной технологией. Это значит, что есть по крайней мере шанс, что теория струн / М-теория соприкоснётся с миром наблюдаемых явлений и войдёт в разряд экспериментальных наук.

Сколь велик этот шанс? Я не знаю, и никто не знает. Моя интуиция говорит мне, что это маловероятно, но моя интуиция основывается на полутора десятилетиях исследований в рамках традиционной концепции струн и дополнительных измерений порядка планковской длины. Возможно, мои инстинкты притупились. К счастью, вопрос будет решён без оглядки на чью-либо интуицию. Если струны достаточно крупные или некоторые из дополнительных измерений достаточно большие, то результаты грядущих экспериментов будут впечатляющими.

В следующей главе мы рассмотрим целый ряд экспериментов, в которых, среди прочего, будет проверена возможность существования относительно крупных струн и дополнительных измерений, так что пока что я лишь разожгу ваш аппетит. Если струны достигают миллиардной от миллиардной доли метра (10^{-18} м), то частицы, соответствующие более высоким колебательным модам (рис. 12.4), уже не будут иметь грандиозных масс, превышающих планковскую массу, как в стандартном сценарии. Их массы будут лишь в 100–1000 раз превосходить массу протона, и это уже попадает в предел достижимости построенного недавно в ЦЕРНе Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider — LHC). Если эти колебательные моды струн будут возбуждены в результате

высокоэнергетических столкновений, то детекторы ускорителя вспыхнут огнями, как хрустальный шар на Таймс-Сквер в канун Нового года. Будет обнаружен целый букет невиданных ранее частиц, причём их массы будут связаны друг с другом, как различные гармоники одной виолончели. Под полученными данными появится такая размашистая подпись теории струн, которая впечатлила бы даже Джона Хэнкока^[83]. Исследователи не смогут пропустить это, даже если забудут надеть свои очки.

Более того, если верен сценарий мира на бране, то высокоэнергетические столкновения могут даже создавать (только вообразите!) миниатюрные чёрные дыры. Хотя мы обычно думаем о чёрных дырах как о гигантских объектах в далёком космосе, но ещё со времён создания общей теории относительности стало известно, что если сжать с достаточной силой горстку материи, то возникнет миниатюрная чёрная дыра. Это не происходит из-за того, что никто (и никакое механическое устройство) даже отдалённо не может приблизиться к тому, чтобы вызвать достаточно большую силу сжатия. Единственно приемлемый механизм создания чёрных дыр включает в себя гравитационное притяжение чудовищно массивной звезды, преодолевающее направленное наружу давление, вызываемое процессами ядерного синтеза внутри неё, что и вызывает коллапс звезды. Но если сила гравитации на микроскопических масштабах гораздо больше, чем думали раньше, то микроскопические чёрные дыры могут быть порождены с помощью существенно меньшей силы сжатия, чем это представлялось. Расчёты показывают, что у Большого адронного коллайдера может хватить мощности, чтобы породить изобилие микроскопических чёрных дыр путём высокоэнергетических столкновений протонов.^[178] Подумайте над тем, сколь ошеломительным это могло бы быть. Большой адронный коллайдер мог бы превратиться в фабрику по производству микроскопических чёрных дыр! Эти чёрные дыры были бы столь малы и исчезали бы за столь короткое время, что не представляли бы для нас ни малейшей угрозы (уже довольно давно Стивен Хокинг показал, что все чёрные дыры распадаются в результате квантовых процессов: крупные чёрные дыры очень медленно, а миниатюрные — очень быстро), но их порождение подтвердило бы одну из самых экзотических идей, выдвинутых когда-либо.

Космология мира на бране

Первой целью современных исследований, проводимых учёными во

всём мире (включая меня), является осмысление космологии с учётом новых достижений теории струн / М-теории. Причина ясна: космология не только имеет дело с глобальными вопросами мироздания, и момент рождения Вселенной не только определяет многие элементы нашего повседневного опыта (такие как стрела времени), но и служит теоретикам тем, чем Нью-Йорк послужил Синатре^[84]: первоклассной испытательной площадкой. Если теория заработает в экстремальных условиях, характеризующих самые ранние моменты существования Вселенной, то она сможет сделать это везде.

В настоящее время ведутся разработки космологии согласно теории струн / М-теории, причём исследователи идут в двух основных направлениях. В первом и более традиционном подходе предполагается, что подобно тому как инфляционная теория описывает краткий, но важный период, предшествовавший периоду, описываемому стандартной теорией Большого взрыва, так и теория струн / М-теория может описывать ещё более ранний и, возможно, ещё более важный период, предшествовавший инфляции. Здесь можно надеяться на то, что теория струн / М-теория избавит нас от неуклюжих заплаток, использованных нами, чтобы покрыть своё неведение о самых ранних моментах рождения Вселенной, а затем космологическая драма будет развёртываться согласно необычайно успешному сценарию инфляционной теории, изложенному в предыдущих главах.

Хотя и был достигнут определённый прогресс, касающийся специфических деталей, требующихся в рамках этого подхода (попытка понять, почему только три пространственных измерения Вселенной претерпели расширение, а также разработка математических методов, которые могут оказаться уместными для анализа беспространственного/вневременного царства, которое могло быть до периода инфляции), но ещё не настал тот момент, когда можно воскликнуть «Эврика!». Интуитивное ощущение состоит в том, что, в то время как в рамках инфляционной космологии размеры наблюдаемой Вселенной всё уменьшаются во всё более ранние моменты времени (и, следовательно, Вселенная становится всё более горячей, плотной и энергетически насыщенной), теория струн / М-теория справляется со столь буйным поведением (физики используют термин «сингулярное поведение»), вводя минимальный размер (как мы обсуждали это в предыдущей главе), ниже которого становятся значимыми новые и менее сингулярные физические величины. Такой подход в рамках теории струн / М-теории позволяет успешно объединить общую теорию относительности с квантовой механикой, и моё инстинктивное чувство

говорит о том, что мы вскоре найдём, как применить этот подход в космологии. Но пока что неуклюжая заплатка всё ещё выглядит неуклюжей, и можно лишь догадываться, когда установится полная ясность.

Во втором подходе используется сценарий мира на бране, и в своём самом радикальном варианте он предлагает совершенно новую космологическую конструкцию. Пока что далеко не ясно, устоит ли этот подход под пристальным математическим взглядом, но он даёт действительно хороший пример того, как прорывы в фундаментальной теории могут открывать новые тропы по хорошо исхоженной территории. Этот подход назван *циклической моделью*.

Циклическая космология

С точки зрения времени нам известны два типа явлений: те, которые имеют явно выраженное начало, середину и конец (чтение этой книги, футбольный матч, человеческая жизнь), и, те, которые носят циклический характер, возобновляясь снова и снова (времена года, восход и закат Солнца, свадьбы Ларри Кинга^[85]). Конечно, при более пристальном взгляде мы обнаруживаем, что и циклические явления имеют своё начало и конец, поскольку циклы не длятся вечно. Солнце всходит и восходит, т. е. Земля вращается вокруг своей оси, вращаясь вокруг Солнца, — так оно есть и так оно и было каждый день в течение 5 млрд лет. Но до этого Солнце и Солнечная система ещё должны были сформироваться. И когда-нибудь, через 5 млрд лет, Солнце превратится в красного гиганта и поглотит свои планеты, включая Землю; и тогда уже не будет даже понятия о восходе и закате Солнца, по крайней мере здесь.

Но это выяснилось благодаря современным научным открытиям. В древности циклические явления казались вечно циклическими. Циклы суток и времён года задают ритм работы и жизни, так что неудивительно, что в некоторых из древнейших космологий считалось, что развёртывание мира является циклическим процессом. Вместо того чтобы вводить начало, середину и конец, циклическая космология постулирует, что мир меняется во времени во многом так же, как Луна проходит свои фазы: после полного цикла всё готово к тому, чтобы начать заново и запустить ещё один цикл.

Со времён создания общей теории относительности предлагалось несколько моделей циклической космологии; самая известная из них была разработана Ричардом Толменом из Калифорнийского технологического института. Толмен предположил, что наблюдаемое расширение Вселенной

может замедлиться, затем остановиться, после чего начнётся период сжатия, во время которого Вселенная будет становиться всё меньше и меньше. Но вместо того чтобы окончательно сжаться и прекратить своё существование, Вселенная могла бы претерпеть *отскок*: пространство могло бы сжаться только до определённого малого размера, а затем «отскочить», начав новый цикл расширения, за которым опять последует сжатие. Теория Вселенной, вечно повторяющей этот цикл — расширение, сжатие, отскок, снова расширение, — элегантно избежала бы тернистых вопросов о своём начале: в таком сценарии само понятие начала теряет смысл, поскольку Вселенная всегда была и всегда будет.

Но Толмен понял, что при ретроспективном взгляде с наших дней циклы бы повторялись только какое-то время, но не бесконечно. Причина кроется в том, что второе начало термодинамики диктует: в течение каждого последующего цикла энтропия должна возрастать.^{179} А согласно общей теории относительности количество энтропии в начале каждого цикла определяет, как долго будет длиться этот цикл. Большее количество энтропии означает более длительный период расширения, прежде чем движение наружу остановится, и движение внутрь возьмёт своё. Поэтому каждый последующий цикл должен длиться гораздо дольше предыдущего; но в ретроспективном взгляде это значит, что предшествовавшие циклы должны быть всё короче и короче. Математический анализ показывает, что постоянное укорачивание циклов ведёт к тому, что они не могут бесконечно уходить в прошлое. Даже в рамках циклической концепции Толмена Вселенная имела бы начало.

В гипотезе Толмена предполагалось, что Вселенная имеет сферическую форму, что, как мы видели, было опровергнуто наблюдениями. Но недавно в рамках представлений теории струн / М-теории был разработан совершенно новый вариант циклической космологии, включающий плоскую Вселенную. Идея исходит от Пола Стейнхардта и его коллеги Нила Тьюрока из Кембриджского университета (с существенным использованием результатов, полученных в сотрудничестве с Бертом Оврутом, Натаном Зайбергом и Джастином Хури); в ней предлагается новый механизм космической эволюции.^{180} Коротко говоря, они предположили, что мы живём внутри 3-браны, которая каждый триллион лет со страшной силой соударяется с другой параллельной 3-браной, находящейся неподалёку. И «взрыв» от столкновения порождает новый космологический цикл.

Основная идея этого предположения проиллюстрирована на рис. 13.7;

она была предложена на несколько лет раньше Хоравой и Виттенем в другом контексте, не связанном с космологией. Хорава и Виттен пытались завершить объединение всех пяти теорий струн и обнаружили, что если одно из семи дополнительных измерений М-теории имеет очень простую форму — не окружности, как на рис. 12.7, а отрезка прямой линии, как на рис. 13.7, — и ограничено так называемыми «концевыми бранами», прикреплёнными как книгодержатель или подставка для книги, тогда можно установить прямую связь между теорией E-гетеротических струн и прочими теориями струн. Детали вывода этой связи не очевидны, но и не существенны для нас (заинтересованный читатель может полистать главу 12 «Элегантной Вселенной»); нам важно лишь то, что эта исходная идея естественным образом следует из самой теории. Стейнхардт и Тьюрок приспособили её для космологии.

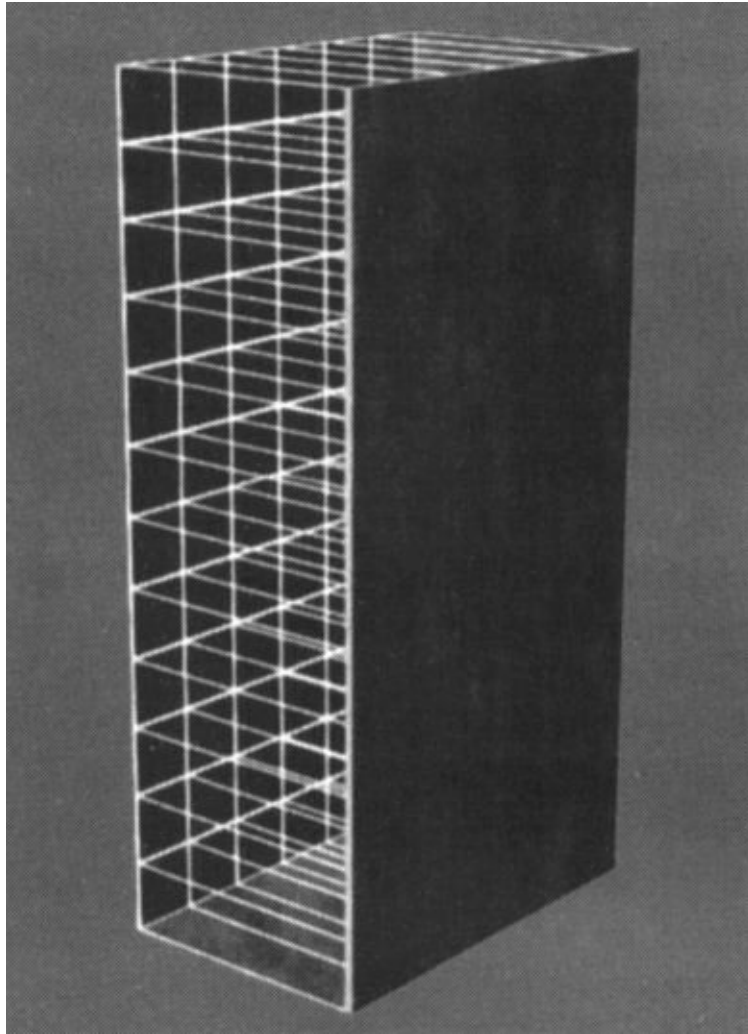


Рис. 13.7. Две 3-браны, разделённые малым расстоянием

Точнее говоря, Стейнхардт и Тьюрок представили, что каждая из бран на рис. 13.7 имеет три пространственных измерения, а соединяющие их отрезки прямых линий представляют четвёртое измерение. Остальные шесть измерений свёрнуты в пространства Калаби–Яу (не отображены на рисунке), имеющие такую форму, чтобы колебательные моды струн соответствовали известным элементарным частицам.^{181} Вселенная, которую мы непосредственно осознаём, соответствует одной из этих 3-бран; если угодно, вы можете считать вторую 3-брану другой Вселенной, обитатели которой (если эту Вселенную вообще кто-либо населяет) ведают только о трёх пространственных измерениях, если их технологии не сильно превосходят наши. При таком устройстве другая 3-брана (другая Вселенная) находится прямо рядом с нами. Она парит не далее чем в миллиметре от нас (по четвёртому пространственному измерению, как на рис. 13.7), но из-за липкости нашей 3-браны и слабости испытываемой нами гравитации у нас нет никаких прямых свидетельств её существования, как и её гипотетические обитатели не подозревают о нашем существовании.

Однако согласно циклической космологической модели Стейнхардта и Тьюрока не всегда было или будет так, как представлено на рис. 13.7. В их модели две 3-браны притягиваются друг к другу (словно они соединены тончайшими резиновыми нитями), и это значит, что каждая из них определяет космологическую эволюцию другой: браны втянуты в нескончаемый цикл — столкновение, отскок, снова столкновение, — в котором вечно регенерируются расширяющиеся трёхмерные миры. Посмотрим на рис. 13.8, иллюстрирующий полный цикл.

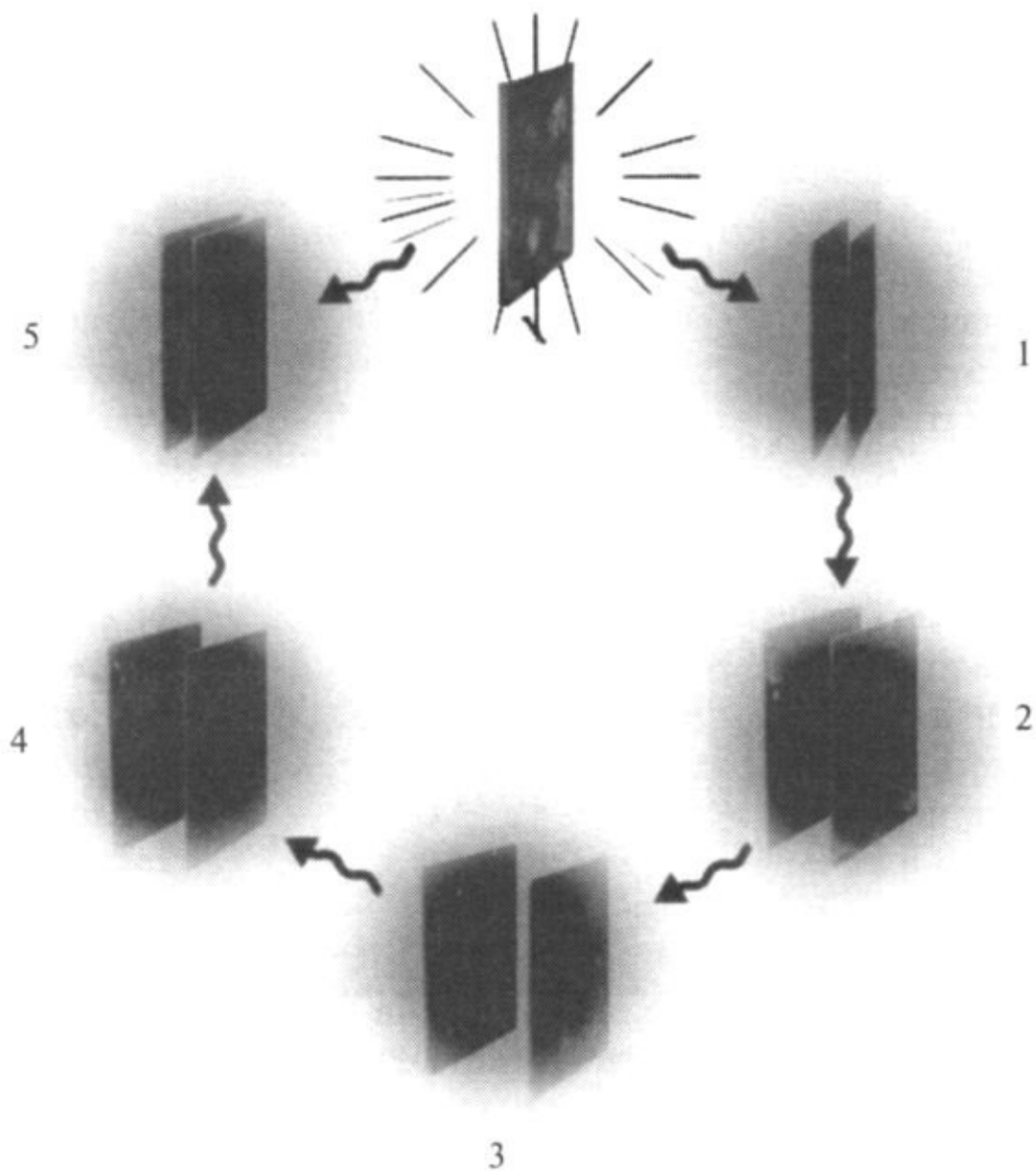


Рис. 13.8. Различные стадии в циклической космологической модели мира на бране

На первой стадии две 3-браны только что столкнулись и теперь отскакивают друг от друга. Грандиозная энергия столкновения порождает значительную массу высокотемпературного излучения и материи на каждой из отскакивающих 3-бран, и (вот что самое главное) Стейнхардт и Тьюрок утверждают, что *точные свойства этой материи и излучения имеют профиль, почти идентичный профилю, возникающему в*

инфляционной модели. Хотя ещё есть разногласия по этому вопросу, но Стейнхардт и Тьюрок твёрдо стоят на том, что столкновение между двумя 3-бранами приводит к физическим условиям, очень близким к тем, что возникают сразу после вспышки инфляционного расширения в более традиционном подходе, рассмотренном в главе 10. Поэтому не удивительно, что для гипотетического наблюдателя, находящегося в нашей 3-бране, следующие несколько стадий циклической космологической модели будут, по сути, такими же, как в стандартной модели, проиллюстрированной на рис. 9.2 (который теперь интерпретируется как эволюция одной из 3-бран). А именно, по мере своего отскока наша 3-брана расширяется и охлаждается, из первородной плазмы постепенно сгущаются космические структуры, такие как звёзды и галактики (вторая стадия). Затем, опираясь на недавние наблюдения за сверхновыми, обсуждавшиеся в главе 10, Стейнхардт и Турк подстроили свою модель так, что примерно за 7 млрд лет (третья стадия) энергия обычной материи и излучения становится достаточно «разреженной» из-за расширения браны, так что начинает преобладать тёмная энергия, которая посредством своего отрицательного давления приводит к эре ускоренного расширения. (Для этого требуется подбирать параметры модели, но, по мнению сторонников этой модели, такой произвол оправдан, поскольку позволяет добиться согласия с наблюдениями.) Спустя примерно 7 млрд лет на Земле появляются люди и начинают наблюдать ранние этапы фазы ускоренного расширения. Затем, за следующий примерно *триллион* лет, происходит не особенно много нового, помимо того что наша 3-брана продолжает своё ускоренное расширение. За этот период наше трёхмерное пространство растягивается настолько колоссально, что материя и излучение почти полностью «теряются» в пространстве, так что мир на бране выглядит почти совершенно пустым и почти полностью однородным (четвёртая стадия).

К этому моменту наша 3-брана завершает свой отскок и начинает снова приближаться ко второй 3-бране. По мере приближения к следующему столкновению квантовые флуктуации струн, прикреплённых к нашей бране, наполняют её однородную пустоту мельчайшей рябью (пятая стадия). Эти флуктуации продолжают расти, по мере того как наша брана набирает скорость; затем происходит катаклизм, когда наша брана ударяется о вторую 3-брану, затем она отскакивает, и цикл возобновляется. Квантовые флуктуации отпечатывают крохотные неоднородности на излучении и материи, возникающие в ходе столкновения, и, во многом подобно инфляционному сценарию, эти отклонения от совершенной

однородности перерастают в сгущения материи, которые в конечном счёте образуют звёзды и галактики.

Таковы основные стадии циклической модели (её также ласково называют *большим шлепком*). Её основные идеи — сталкивающиеся миры на бранах — резко отличаются от основ инфляционной теории, но тем не менее в этих двух моделях есть общие важные положения. В обеих теориях считается, что изначальная неоднородность создаётся квантовыми возмущениями. В действительности, Стейнхардт и Тьюрок утверждают, что уравнения, описывающие квантовую рябь в циклической модели, почти идентичны уравнениям инфляционной теории, так что и неоднородности, предсказываемые двумя этими теориями, тоже почти идентичны. ^[182] Более того, хотя в циклической модели нет стремительного инфляционного расширения, но его заменяет период в триллион лет (начиная с третьей стадии) более мягкого ускоренного расширения. Это всего лишь вопрос постановки вопроса; на то, что в инфляционной модели достигается за мгновение ока, в циклической модели уходит почти вечность. Поскольку в циклической модели столкновение не знаменует начало Вселенной, то можно неторопливо решить космологические проблемы (такие как проблема плоского пространства и проблема горизонта) за последние триллионы лет каждого *предыдущего* цикла. Эры мягкого, но постоянно ускоренного расширения в конце каждого цикла растягивают 3-брану, делая её плоской и вполне однородной, за исключением мельчайших, но важных квантовых флуктуаций. Так что долгая финальная стадия каждого цикла, за которой следует шлепок в начале следующего цикла, даёт среду, очень близкую к той, что возникает за кратчайший период расширения в инфляционной модели.

Беглая оценка

В настоящий момент как инфляционная, так и циклическая модели представляют собой глубокие космологические разработки, но ни одна из них не является законченной теорией. Незнание преобладающих условий в самые ранние моменты возникновения Вселенной вынуждает сторонников инфляционной космологии просто предположить, без теоретического обоснования, что в то время возникли условия, требующиеся для инфляции. Если они действительно возникали, то инфляционная теория решает многочисленные космологические загадки и объясняет стрелу времени. Но её успех в первую очередь зависит от того, что действительно

происходило. Более того, инфляционная космология не была согласована с теорией струн и поэтому не разделяет успех теории струн в деле объединения квантовой механики и общей теории относительности.

В циклической модели есть свои недостатки. Как и в случае с моделью Толмена, соображения, связанные с накоплением энтропии (а также квантово-механические соображения^[183]), показывают, что циклы не могли идти вечно. Циклы должны были когда-то начаться в прошлом, и поэтому, как и в инфляционной модели, нужно объяснить, как всё началось. С этой оговоркой циклическая теория, подобно инфляционной теории, решает основные космологические проблемы и устанавливает стрелу времени, указывающую направление от низкоэнтропийного шлепка через последующие стадии (рис. 13.8). Однако согласно современным представлениям циклическая модель никак не объясняет, каким образом или почему Вселенная оказалась в должной конфигурации, отражённой на рис. 13.8. Например, почему шесть пространственных измерений свернулись в требуемое многообразие Калаби–Яу, тогда как одно из дополнительных измерений послушно приняло форму пространственного сегмента, разделяющего две 3-браны? Как так вышло, что две 3-браны так совершенно выровнялись по отношению друг к другу и притягиваются как раз с нужной силой, требующейся для того, чтобы все стадии на рис. 13.8 шли так, как мы их описали? И, прежде всего, что в действительности происходит, когда две 3-браны сталкиваются в версии циклической модели взрыва?

Что касается последнего вопроса, то есть надежда, что шлепок циклической модели менее проблематичен, чем сингулярность в нулевое время, возникающая в инфляционной космологии. В рамках циклического подхода бесконечно сжимается не всё пространство, а только одно измерение между бранами; в ходе каждого цикла сами браны испытывают не сжатие, а расширение. И это, согласно Стейнхардту, Тьюроку и их сотрудникам, подразумевает *конечную* температуру и *конечную* плотность на самих бранах. Но это лишь очень предварительный вывод, поскольку пока что никому не удалось как следует выписать уравнения и вычислить, что происходит, когда сталкиваются браны. В действительности, предварительный анализ указывает на то, что в момент шлепка возникает та же проблема, что и в нулевой момент времени в инфляционной теории: известная математика перестаёт работать. Таким образом, в космологии всё ещё остаётся проблема сингулярного начала — будь это «настоящее» начало Вселенной или начало нашего текущего цикла.

Наиболее впечатляет то, как циклическая модель включает в себя

тёмную энергию и наблюдаемое ускоренное расширение. Открытие в 1998 г. ускоренного расширения Вселенной явилось немалым сюрпризом для большинства физиков и астрономов. Ускоренное расширение можно включить в картину, рисуемую инфляционной космологией, если предположить, что Вселенная содержит нужное количество тёмной энергии, но это предположение выглядит неуклюжим придатком. В циклической же модели тёмная энергия естественно играет центральную роль. Триллионный период плавного, но неизменно ускоренного расширения необходим для «расчистки сцены», для крайнего «разжижения» наблюдаемой Вселенной и создания условий для начала следующего цикла. Как инфляционная, так и циклическая модели опираются на ускоренное расширение (в инфляционной модели ускоренное расширение нужно в начальный момент Вселенной, а в циклической модели — в конце каждого цикла), но только в циклической модели ускоренное расширение подтверждается прямыми наблюдениями. (Напомним, что согласно циклической модели мы только вошли в стадию ускоренного расширения, и такое расширения было недавно обнаружено.)

Это несомненный плюс в копилку циклической модели, но это также означает, что если в будущих наблюдениях ускоренное расширение *не* будет подтверждено, то инфляционная модель ещё сможет пережить это (хотя снова возникнет загадка нехватки 70% энергии в «бюджете» Вселенной), но циклическая модель станет непригодной.

Новый взгляд на пространство и время

Как сам сценарий мира на бране, так и родившаяся из него космологическая модель в высшей степени гипотетичны. Я рассказал о них не столько из-за того, что уверен в их справедливости, сколько из-за того, что хотел проиллюстрировать совершенно новые подходы к осмыслению населяемого нами пространства и его эволюции — подходы, возникшие из теории струн / М-теории. Если мы живём внутри 3-браны, то сакраментальный вопрос о материальности трёхмерного пространства получит самый определённый ответ: поскольку пространство окажется браной, то, несомненно, оно есть «нечто». И в нём не будет ничего особенного, поскольку может быть множество других бран, причём разных размерностей, дрейфующих в пространстве более высокой размерности, задаваемой теорией струн / М-теории. И если космологическая эволюция нашей 3-браны направляется повторяющимися соударениями с

близлежащей браной, то время, каким мы его знаем, будет охватывать лишь один из множества циклов Вселенной, от одного «шлепка» до другого.

Такой взгляд кажется мне одновременно волнующим и смиренным. Пространство и время могут таить в себе гораздо большее, чем мы думали; в таком случае то, что мы считали «всем», может обернуться лишь малой составляющей гораздо более богатой реальности.

Часть V. Реальность и воображение

Глава 14. Вверх в небеса и вниз на землю

Эксперименты с пространством и временем

Мы прошли долгий путь со времён Эмпедокла из Агридженто, объяснявшего Вселенную с помощью земли, воздуха, огня и воды. И большая часть достигнутого нами прогресса, со времён Ньютона и до революционных открытий XX в., впечатляюще подкреплялась экспериментальным подтверждением точных и детальных теоретических предсказаний. Но с середины 80-х гг. XX в. мы стали жертвами собственного успеха. В непрестанном стремлении ещё дальше продвинуть границы понимания наши теории достигли областей, недостижимых для современной технологии.

Тем не менее при должном усердии и удаче многие передовые идеи будут проверены в течение следующих десятилетий. Как мы увидим в данной главе, планируемые или проводимые сейчас эксперименты могут пролить свет на существование дополнительных измерений, на состав тёмной материи и тёмной энергии, на происхождение массы и на океан Хиггса, на космологию ранней Вселенной, на суперсимметрию и, возможно, на достоверность самой теории струн. И если нам чуть больше улыбнётся удача, то могут быть окончательно проверены некоторые многообещающие передовые идеи, касающиеся единой теории, природы пространства и времени и нашего космического начала.

Эйнштейновское увлечение

В течение десятилетий, направленных на создание общей теории относительности, Эйнштейн черпал своё вдохновение из множества источников. Самой влиятельной оказалась геометрия кривых поверхностей, разработанная в XIX в. рядом математических светил, включая Карла Фридриха Гаусса, Яноша Бояи, Николая Лобачевского и Георга Бернхарда Римана. Как мы говорили в главе 3, Эйнштейн также был вдохновлён идеями Эрнста Маха. Напомним, что Мах отстаивал реляционную концепцию пространства: в его представлении пространство служит языком для определения положения одного объекта по отношению к другому, но само оно не является независимой сущностью. Сначала Эйнштейн был твёрдым сторонником точки зрения Маха, поскольку она

отражала крайнюю степень относительности, которая могла бы быть поддержана теорией относительности. Но со временем Эйнштейн осознал, что общая теория относительности не полностью включает в себя идеи Маха. Согласно общей теории относительности поверхность воды в ведре Ньютона, вращающемся в совершенно пустом пространстве, примет вогнутую форму, и это конфликтует с чисто реляционной точкой зрения, поскольку подразумевает концепцию абсолютного ускорения. Но всё же общая теория относительности действительно включает в себя некоторые элементы точки зрения Маха, и в ближайшие несколько лет планируется провести эксперимент, который разрабатывался в течение сорока лет и обойдётся в более чем 500 млн долларов. В этом эксперименте будет проверено одно из главных положений во взглядах Маха.

Ещё в 1918 г. австрийские физики Джозеф Ленс и Ханс Тирринг на основе общей теории относительности показали, что, подобно тому как массивные объекты искривляют пространство и время (подобно шару для игры в боулинг, положенному на батут), так и вращающиеся предметы увлекают за собой пространство (и время), подобно вращающемуся камню, погружённому в ведро с сиропом. Этот эффект, названный *эффектом увлечения инерциальной системы отсчёта*, означает, к примеру, что астероид, свободно падающий на быстро вращающуюся нейтронную звезду или чёрную дыру, будет захвачен в воронку вращающегося пространства и начнёт двигаться по скрученной траектории. Название эффекта связано с тем, что с точки зрения астероида (в системе отсчёта, связанной с астероидом) его вовсе ничего никуда не увлекает, а падает он прямо вниз по координатной сетке. Но поскольку пространство закручено (как на рис. 14.1), то и сетка загибается, из-за чего понятие «прямо вниз» с точки зрения астероида отличается от этого понятия с точки зрения отдалённого наблюдателя.

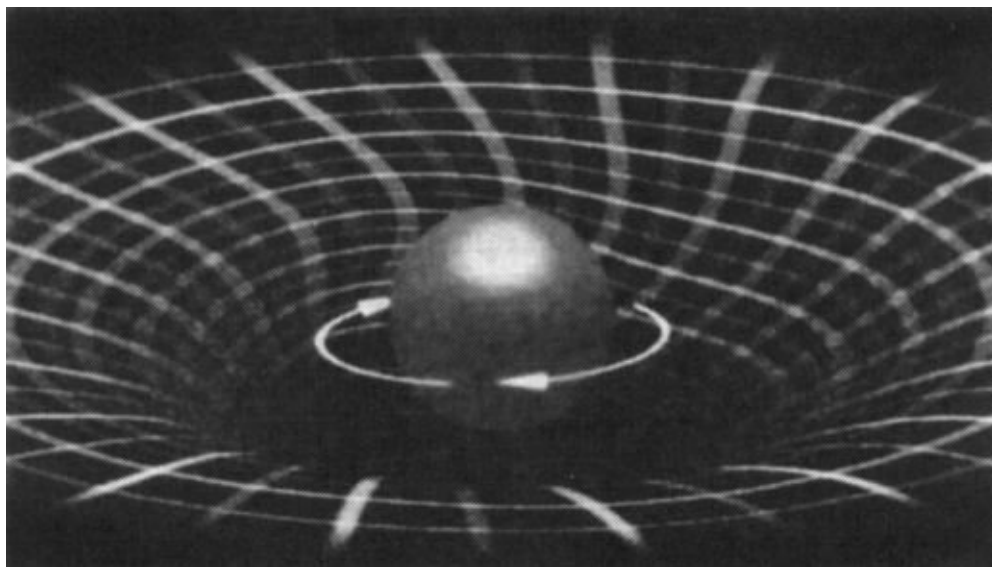


Рис. 14.1. Вращающийся массивный объект увлекает за собой пространство (свободно падающую систему отсчёта)

Чтобы увидеть связь с точкой зрения Маха, подумайте об эффекте увлечения, вызываемом вращающимся массивным объектом, но полым внутри. Расчёты, начатые Эйнштейном в 1912 г. (ещё даже до завершения общей теории относительности), затем значительно продвинутые в 1965 г. Дитером Бриллом и Джеффри Коэном и окончательно завершённые в 1985 г. немецкими физиками Гербертом Пфистером и К. Брауном, показали, что пространство внутри полый сферы тоже будет захватываться вращательным движением и закручиваться как в водовороте.^[184] Если неподвижное ведро с водой (неподвижное по отношению к удалённому наблюдателю) поместить внутрь такой вращающейся сферы, то, согласно расчётам, вращающееся пространство окажет силовое воздействие на неподвижную воду, вынудив её приподняться вблизи стенки ведра, из-за чего поверхность воды примет вогнутую форму.

Этот результат безмерно порадовал бы Маха. Хотя ему могло бы не понравиться описание в терминах «вращающегося пространства» (поскольку эта фраза подразумевает, что пространство является некой сущностью), но его чрезвычайно обрадовал бы тот факт, что именно *относительное* вращательное движение между сферой и ведром вызывает изменение формы поверхности воды. Действительно, если масса сферической оболочки достаточно велика, так что оказываемое ею гравитационное воздействие сравнимо с гравитационным воздействием со стороны всей Вселенной, то, согласно расчётам, не важно, считать ли сферу

вращающейся вокруг ведра или ведро вращающимся внутри сферы — результат от этого не изменится. Как и утверждал Мах, имеет значение лишь относительное вращение сферы и ведра. И поскольку в расчётах используются только уравнения общей теории относительности, то рассмотренный пример явно отражает точку зрения Маха в теории Эйнштейна. (Тем не менее общая теория относительности расходится со стандартным рассуждением в духе Маха, предсказывающим, что поверхность останется плоской, если ведро будет вращаться в совершенно пустой Вселенной. Пфистер и Браун показали лишь то, что достаточно массивная сфера может полностью блокировать обычное влияние пространства за пределами самой сферы.)

В 1960 г. Леонард Шифф из Стэнфордского университета и Жорж Пью из Министерства обороны США независимо предположили, что эффект увлечения, предсказываемый общей теорией относительности, может быть экспериментально проверен с использованием вращательного движения Земли вокруг своей оси. Дело вот в чём. Согласно ньютоновской физике вращающийся гироскоп (вращающееся колесо, прикреплённое к оси), находящийся на орбите высоко над поверхностью Земли, будет указывать своей осью в неизменном направлении. Но согласно общей теории относительности ось гироскопа будет медленно смещаться из-за того, что Земля увлекает за собой пространство. Поскольку масса Земли ничтожна по сравнению с массой гипотетической поллой сферы, принятой в расчётах Пфистера и Брауна, о которых говорилось выше, то и смещение оси, вызываемое эффектом увлечения, тоже будет ничтожным. Вычисления показали, что если ось гироскопа изначально была нацелена на некую удалённую опорную звезду, то год спустя из-за медленно вращающегося пространства ось гироскопа сместится на стотысячную долю градуса. На такой угол отклоняется секундная стрелка часов приблизительно за две миллионные доли секунды, так что обнаружение такого отклонения представляет собой труднейшую научную, технологическую и инженерную задачу.

После сорока лет исследований и разработок, а также сотни докторских диссертаций на эту тему, группа из Стэнфордского университета, возглавляемая Фрэнсисом Эвериттом и финансируемая НАСА, готова провести этот эксперимент. В течение нескольких ближайших лет их спутник «*Gravity Probe B*», оснащённый четырьмя самыми стабильными гироскопами, будет выведен на околоземную орбиту с высотой около 700 км, где и попытается измерить эффект увлечения, вызванный вращением Земли. В случае удачи будет получено одно из

самых точных подтверждений общей теории относительности, и оно явится первым прямым подтверждением взглядов Маха.^[185] Равным образом интригует возможность того, что в экспериментах обнаружится отклонение от предсказаний общей теории относительности.^[86] Такая микроскопическая трещина в фундаменте основания общей теории относительности может обернуться как раз тем, что нам требуется, чтобы экспериментально проникнуть в доселе скрытые свойства пространства-времени.

Ловля волны

Существенный вывод общей теории относительности состоит в том, что масса и энергия вызывают искажение ткани пространства-времени; мы проиллюстрировали это на рис. 3.10, показав искривлённую координатную сетку пространства вокруг Солнца. Однако на неподвижной иллюстрации невозможно отразить, как развиваются искажения и искривления пространства по мере движения массы и энергии или при изменении их взаимного расположения.^[186] Общая теория относительности предсказывает, что, подобно тому как батут принимает фиксированную искривлённую форму, если вы неподвижно на нём стоите, но поднимается и опускается, когда вы прыгаете на нём, так и пространство принимает фиксированную искривлённую форму, если материя совершенно неподвижна, как на рис. 3.10, но по ткани пространства проносится рябь, когда материя движется вперёд-назад. Эйнштейн понял это между 1916 и 1918 гг., когда применил только что написанные уравнения общей теории относительности, чтобы показать, что — во многом подобно тому как колебание электрических зарядов в передающей антенне вызывает электромагнитные волны (так и возникают радиоволны и телевизионные волны) — подобное движение материи (например, при взрыве сверхновой звезды) вызывает гравитационные волны. А поскольку гравитация — суть искажение пространства, то гравитационные волны являются волнами кривизны. Подобно тому как брошенный в пруд камешек вызывает распространяющиеся от места падения волны на поверхности воды, так и вращающаяся по кругу материя вызывает распространяющиеся волны пространства; и согласно общей теории относительности взрыв отдалённой сверхновой тоже подобен космическому камню, брошенному в пруд пространства-времени, как показано на рис. 14.2. На рисунке подчёркивается важная отличительная особенность гравитационных волн:

в отличие от электромагнитных, звуковых и поверхностных волн — волн, распространяющихся *через* пространство, — гравитационные волны распространяются в пространстве. Они являются распространяющимися искажениями геометрии самого пространства.

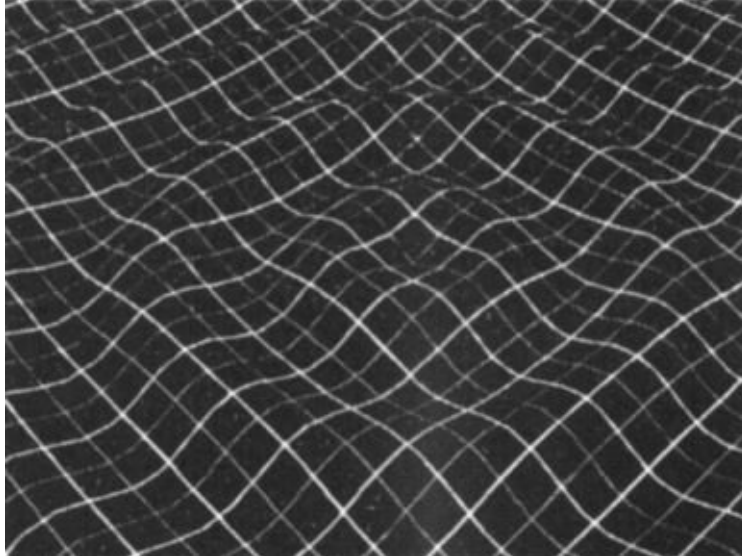


Рис. 14.2. Гравитационные волны являются рябью ткани пространства-времени

Хотя гравитационные волны сейчас воспринимаются как следствие общей теории относительности, но в течение многих лет этот вопрос тонул в путанице и разногласиях, по крайней мере отчасти из-за слишком большой приверженности философии Маха. Если бы общая теория относительности полностью включала бы в себя идеи Маха, то «геометрия пространства» явилась бы просто удобным языком для описания положения и движения массивных объектов по отношению друг к другу. В таком представлении пустое пространство было бы просто пустой концепцией, так какой же смысл был бы в волнообразном движении пустого пространства? Многие физики пытались доказать, что предполагаемые волны в пространстве — это всего лишь неверная интерпретация математики общей теории относительности. Но при должном подходе теоретические рассуждения сходятся на одном верном выводе: гравитационные волны реальны, и по пространству *могут* распространяться волны.

С каждым проходящим пиком и впадиной гравитационная волна будет растягивать пространство (и всё в нём) в одном направлении и сжимать пространство (и всё в нём) в перпендикулярном направлении, как это

показано на рис. 14.3. В принципе, можно обнаружить прохождение гравитационных волн, периодически измеряя расстояние между различными точками и обнаружив, что отношение этих расстояний периодически меняется.



Рис. 14.3. Проходящая гравитационная волна растягивает объект сначала в одном направлении, затем — в другом (ради наглядности искажение пространства на этом рисунке очень сильно преувеличено)

Но на практике ещё никто не сумел сделать это, так что никто прямо гравитационные волны пока не обнаружил. (Однако есть веское, пусть и косвенное, подтверждение их существования.)^{[187](#)} Трудность состоит в том, что возмущение от проходящей гравитационной волны обычно чрезвычайно мало. Атомная бомба «Тринити», испытанная 16 июля 1945 г. и равная по мощности 20 тыс. т тротила, вызвала столь яркое свечение, что наблюдателям, находившимся на расстоянии многих километров от места взрыва, нужно было защищать глаза, чтобы не повредить их электромагнитными волнами, которые сгенерировал взрыв. И всё же, даже если бы вы стояли прямо под тридцатиметровой стальной вышкой, на которой была взорвана бомба, то гравитационные волны, порождённые взрывом, растянули бы ваше тело в каком-либо направлении всего лишь на ничтожную долю размера атома. Вот насколько слабы гравитационные возмущения. Это даёт представление о трудности технологических проблем, связанных с обнаружением гравитационных волн. (Поскольку гравитационную волну можно также рассматривать как громадное количество гравитонов, движущихся скоординированным образом, — точно так же, как электромагнитную волну можно считать состоящей из громадного количества скоординированных фотонов, — то это также даёт представление о трудности обнаружения *отдельного* гравитона).

Конечно, у нас нет никакого специального интереса искать гравитационные волны от взрыва атомного оружия, но ситуация с астрономическими наблюдениями ничуть не легче. Чем ближе к нам и чем массивнее астрономический объект, а также с чем большим ускорением он движется, тем сильнее излучаемые им гравитационные волны. Но даже если взорвётся и станет сверхновой звезда, удалённая от нас на расстояние 10 000 световых лет, то достигшая Земли гравитационная волна растянёт метровый стержень лишь на миллионную от миллиардной доли сантиметра, что составляет примерно сотую часть размера атомного ядра. Так что если только не произойдёт невероятное астрономическое событие катастрофического характера относительно недалеко от нас, то обнаружение гравитационной волны потребует аппаратуры, способной регистрировать чрезвычайно малые изменения расстояний.

Учёные, спроектировавшие и построившие лазерный интерферометр LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory — лазерный интерферометр гравитационно-волновой обсерватории), приняли этот вызов. (Этот проект был запущен совместно Калифорнийским технологическим институтом и Массачусетским технологическим институтом и финансировался Национальным фондом науки США). LIGO является впечатляющей установкой, а ожидаемая чувствительность поражает всяческое воображение. Она состоит из двух полых труб, каждая из которых составляет *четыре километра* в длину и чуть более метра в ширину; эти трубы расположены в виде гигантской буквы L. Для достижения огромной точности измерения относительной длины труб используется лазерный свет, одновременно посылаемый в вакуумные туннели внутри каждой трубы и отражаемый безупречно отшлифованными зеркалами на концах труб. Идея состоит в том, что если гравитационная волна пройдёт через установку, то она растянёт одну трубу относительно другой, и если это растяжение будет достаточно большим, то учёные смогут обнаружить его.

Трубы сделаны столь длинными из-за того, что растяжение и сжатие, вызываемое гравитационной волной, пропорционально длине объекта. Если гравитационная волна растягивает четырёхметровый стержень, скажем, на 10^{-20} м, то она вытянет четырёхкилометровый стержень уже на 10^{-17} м, т. е. в тысячу раз больше. Поэтому чем длиннее объект, тем легче обнаружить изменение его длины. С целью усиления этого эффекта в экспериментах LIGO лазерные лучи совершают более сотни пробегов между зеркалами на противоположных концах каждой трубы, что

увеличивает «эффективную длину» до 800 км. Благодаря таким уловкам и инженерному искусству установка LIGO сможет обнаружить изменение длины трубы, превосходящее триллионную долю толщины человеческого волоса или сто миллионную долю размера атома.

Но это ещё не всё: на самом деле есть две такие L-образные установки. Одна находится в Ливингстоне (штат Луизиана), а другая примерно на расстоянии 3500 км от неё в Хэнфорде (штат Вашингтон).^[87] Если гравитационная волна от некоего удалённого астрофизического взрыва докатится до Земли, то она должна оказать одинаковое воздействие на каждый детектор, так что любая волна, пойманная в одной экспериментальной установке, должна обнаружиться и в другой. Это важная проверка на состоятельность, поскольку при всех принятых мерах предосторожности возмущения из повседневной жизни (громыхание проезжающего грузовика, скрежет бензопилы, сотрясение от упавшего дерева и т. д.) могут быть приняты за воздействие гравитационных волн. Требование соответствия показаний удалённых детекторов обеспечивает исключение таких ложных проявлений.

Исследователи также аккуратно рассчитали частоты гравитационных волн — количество пиков и впадин, которые должны проходить через детектор каждую секунду, — вызываемых рядом астрофизических явлений, включая взрывы сверхновых, вращательное движение несферических нейтронных звёзд и столкновения чёрных дыр. Без этой информации эксперименты уподобились бы поиску иголки в стоге сена; располагая этой информацией, учёные могут настроить свои детекторы на узкий диапазон частот, представляющий физический интерес. Любопытно, что расчёты показали: частоты некоторых гравитационных волн должны находиться в диапазоне нескольких тысяч колебаний в секунду; если бы это были звуковые волны, они попали бы в диапазон восприимчивости человеческого уха. Объединяющиеся нейтронные звёзды зазвучали бы как щебетание с быстро растущим тоном, а пара сталкивающихся чёрных дыр имитировала бы чириканье воробья, получившего резкий удар в грудь. Существует запутанная какофония гравитационных волн, прокатывающихся по ткани пространства-времени, и если всё пойдёт по плану, то установка LIGO будет первым инструментом, настроившимся на неё.^[188]

Самое волнующее заключается в том, что гравитационные волны наследуют два основных свойства гравитации: слабость и вездесущность. Из всех четырёх видов взаимодействий гравитация слабее всего

взаимодействует с материей. Это означает, что гравитационные волны могут проходить через материалы, непроницаемые для света, и тем самым открыть доступ в астрофизические области, остававшиеся доселе скрытыми. Более того, поскольку всё подвержено гравитации (тогда как, например, электромагнитная сила воздействует только на объекты, несущие электрический заряд), то всё в состоянии генерировать гравитационные волны и, следовательно, заявлять о своём существовании. Тем самым LIGO знаменует важную поворотную точку в наших способах исследования космоса.

Было время, когда мы могли наблюдать небо лишь невооружённым глазом. В XVII в. Ганс Липпершей и Галилео Галилей изменили такое положение дел; благодаря телескопу перед взором человечества развернулась великая панорама космоса. Но со временем мы поняли, что видимый свет представляет лишь узкий диапазон электромагнитных волн. В XX в. благодаря инфракрасным, радио, рентгеновским и гамма-телескопам космос раскрыл нам чудеса, невидимые в диапазоне длин волн, которые могут воспринимать наши глаза. Теперь, в XXI в., мы снова открываем небеса. С помощью установки LIGO и её дальнейших модернизаций^[88] мы увидим космос совершенно по-новому. Вместо электромагнитных мы будем использовать гравитационные волны; вместо электромагнитной мы будем использовать гравитационную силу.

Чтобы оценить революционность этой новой технологии, представьте мир, в котором инопланетные учёные только что открыли, как обнаруживать электромагнитные волны (свет), и подумайте о том, сколь глубоко изменится вскоре их представление о Вселенной. Мы находимся на грани первого обнаружения гравитационных волн и поэтому можем оказаться в аналогичном положении. Тысячелетиями мы вглядывались в космос; теперь, словно впервые в человеческой истории, мы будем вслушиваться в него.

Поиск дополнительных измерений

До 1996 г. в большинстве теоретических моделей, включающих дополнительные измерения, представлялось, что их пространственная протяжённость имеет порядок планковской длины (10^{-33} см). Поскольку это на семнадцать порядков меньше предела, разрешимого с помощью современного оборудования, то без открытия новой чудодейственной технологии планковская физика будет оставаться вне досягаемости. Но

если дополнительные измерения «велики», т. е. их протяжённость превышает сотую от миллиардной от миллиардной доли метра (10^{-20} м), что примерно равно миллионной доли размера атомного ядра, то есть надежда.

Как мы говорили в главе 13, если одно из дополнительных измерений «очень велико» (порядка миллиметра), то точные измерения силы гравитации должны вскрыть их существование. Такие эксперименты проводились в течение ряда лет, и их методика быстро совершенствовалась. До сих пор отклонений от закона обратных квадратов, характерного для трёх пространственных измерений, выявлено не было, так что исследователи переходят ко всё более мелким масштабам расстояний. Обнаруженное отклонение потрясло бы, если не сказать большего, основания физики. Оно послужило бы веским доказательством существования дополнительных измерений, доступных только для гравитации, и дало бы косвенное подтверждение сценария мира на бране в теории струн / М-теории.

Если дополнительные измерения велики, но недостаточно велики, то вряд ли они будут обнаружены в экспериментах с гравитацией, однако остаются и другие, косвенные подходы, указывающие на их существование. Например, мы уже указывали на то, что из существования больших дополнительных измерений следовало бы, что «исконная» сила гравитации больше, чем мы полагали. Наблюдаемая слабость гравитационного взаимодействия могла бы быть приписана «утечке» в дополнительные измерения, а не его исходной слабости; и на коротких расстояниях, когда ещё нет этой «утечки», гравитация могла бы быть сильной. Среди прочего это означает, что порождение миниатюрных чёрных дыр потребовало бы гораздо меньше массы и энергии, чем во Вселенной со значительно более слабой гравитацией. В главе 13 мы обсуждали возможность того, что такие микроскопические чёрные дыры могли бы быть порождены высокоэнергетическими столкновениями протонов в Большом адронном коллайдере (LHC) — ускорителе частиц, который строится сейчас в Женеве (Швейцария) и по плану должен быть запущен в 2007 г.^[89] Это волнующая перспектива. Но есть и другая соблазнительная возможность, указанная Альфредом Шапиром из университета Кентукки и Джонатаном Фенгом из университета Калифорнии в Ирвине. Эти исследователи заметили, что космические лучи — элементарные частицы, приходящие из космоса и постоянно бомбардирующие нашу атмосферу, — также могут порождать

микроскопические чёрные дыры.

Космические лучи были открыты в 1912 г. австрийским учёным Виктором Хессом; спустя более чем девяносто лет они всё ещё окутаны множеством тайн. Космические лучи каждую секунду вторгаются в атмосферу и вызывают целый каскад миллиардов частиц, низвергающихся на Землю и проходящих через наши тела; некоторые из них обнаруживаются с помощью ряда специальных приборов. Однако никто полностью не уверен, из каких частиц состоят космические лучи (хотя учёные всё больше приходят к соглашению, что они состоят из протонов), и несмотря на тот факт, что некоторые из этих высокоэнергетических частиц являются, по-видимому, отголосками взрывов сверхновых звёзд, ни у кого нет ни малейшего представления, откуда исходят космические лучи. Например, 15 октября 1991 г. детектор космических лучей «Мушиный глаз» («Fly's Eye») в пустыне Юта зафиксировал частицу, пронёсшуюся по небу с энергией, эквивалентной 30 млрд масс протона.^[90] В этой единственной субатомной частице содержится примерно столько же энергии, как в мяче, мчащемся от удара бейсболиста Мариано Риверы, что в 100 млн раз превосходит характерную энергию частиц, которые будут рождаться в Большом адронном коллайдере.^[189] Самое загадочное состоит в том, что ни один из известных нам астрофизических процессов не смог бы породить частицы с такой высокой энергией; надеясь решить эту загадку, экспериментаторы собирают всё больше данных с помощью всё более чувствительных детекторов.

Но происхождение высокоэнергетических частиц космических лучей мало заботило Шапира и Фенга. Они подметили, что если гравитация на микроскопических масштабах гораздо сильнее, чем считалось ранее, то безотносительно к тому, откуда приходят такие частицы, у них могло бы хватить энергии, чтобы породить миниатюрные чёрные дыры при соударениях в верхних слоях атмосферы.

Такие миниатюрные чёрные дыры (порождаемые хоть космическими лучами, хоть в ускорителях частиц) не могут представлять никакой опасности ни для экспериментаторов, ни для мира в целом. После своего порождения они быстро бы разрушались, посылая характерный каскад других, более привычных частиц. В действительности микроскопические чёрные дыры столь короткоживущие, что экспериментаторы даже не будут пытаться непосредственно обнаруживать их; вместо этого они будут искать доказательства краткого существования чёрных дыр путём тщательного изучения каскада частиц, обрушивающегося на их детекторы. Самый

чувствительный в мире детектор космических лучей — обсерватория имени Пьера Оже («Pierre Auger Observatory», с площадью наблюдения размером порядка Род Айленда, 4 тыс. кв. км) строится в настоящее время в обширной местности в западной Аргентине. По оценкам Шапира и Фенга, если все дополнительные измерения доходят до размера порядка 10^{-14} м, то после годовичного сбора данных на детекторе Оже обнаружатся характерные следы от приблизительно дюжины миниатюрных чёрных дыр, рождавшихся в верхних слоях атмосферы.^[91] Если эти следы не обнаружатся, значит, дополнительные измерения меньше. Поиск следов чёрных дыр, рождаемых космическими лучами, является, несомненно, очень непростым делом, но в случае успеха появится первое экспериментальное подтверждение существования дополнительных измерений и микроскопических чёрных дыр, а также теоретических построений теории струн и квантовой гравитации.

Помимо рождения чёрных дыр существует и другой способ обнаружения дополнительных измерений, который будет задействован в следующем десятилетии с помощью ускорителей частиц. Идея этого способа представляет собой изощрённый вариант объяснения пропажи монет из вашего кармана, заваливающихся за подкладку пиджака.

Главным принципом физики является закон сохранения энергии. Энергия может проявляться во многих формах — в кинетической энергии мяча, летящего по бейсбольной площадке, в гравитационной потенциальной энергии, когда мяч набирает высоту, в звуковой и тепловой энергии, когда мяч ударяется о землю и возбуждает разнообразные колебательные движения, в энергии массы, заключённой в самом мяче, и т. д. — но при учёте всех составляющих энергии полная энергия всегда сохраняется.^[190] До сих пор ни в одном эксперименте не было обнаружено нарушения этого закона совершенного баланса энергии.

Но в зависимости от точного размера предполагаемых дополнительных измерений высокоэнергетические эксперименты, которые должны быть проведены с вновь усовершенствованным оборудованием в Фермилабе (лаборатория Fermilab — Fermi National Accelerator Laboratory) и на ЛНС, могут вскрыть процессы, которые на первый взгляд будут нарушать закон сохранения энергии: энергия после столкновения может оказаться меньше энергии до столкновения. Причина, напоминающая причину пропажи монет из кармана, состоит в том, что энергия (переносимая гравитонами) может ускользнуть в щель — микроскопическое дополнительное пространство, — возникающую из-за

существования дополнительных измерений, и оказаться неучтённой при расчёте баланса энергии. Возможное обнаружение такого «сигнала пропажи энергии» даст ещё один способ установления того, что ткань космоса намного сложнее, чем мы можем видеть непосредственно.

Несомненно, я пристрастен, когда речь заходит о дополнительных измерениях. В течение более чем пятнадцати лет я работал над различными проявлениями дополнительных измерений, так что они занимают особое место в моём сердце. Но всё же, даже с учётом этого признания, мне трудно представить более завораживающее открытие, чем обнаружение доказательства существования дополнительных измерений помимо трёх, известных всем нам. По моему мнению, в настоящее время нет других серьёзных предположений, подтверждение которых столь основательно бы потрясло устои физики и столь основательно бы установило, что мы должны ставить под сомнение базисные элементы реальности, кажущиеся самоочевидными.

Океан Хиггса, суперсимметрия и теория струн

Помимо научного вызова, состоящего в поиске неизвестного и шанса обнаружения доказательства существования дополнительных измерений, есть ещё пара специфических мотивов для усовершенствования ускорителя в Фермилабе и построения гигантского Большого адронного коллайдера. Один из этих мотивов — обнаружение частиц Хиггса. Как мы уже говорили в главе 9, неуловимые частицы Хиггса явились бы мельчайшими составляющими поля Хиггса — поля, которое, по предположению физиков, образует океан Хиггса и тем самым придаёт массу другим фундаментальным видам частиц. Согласно современным теоретическим и экспериментальным представлениям частицы Хиггса должны обладать массой в диапазоне от ста до тысячи масс протона. Если верна нижняя оценка, то у Фермилаба есть достаточно хорошие шансы открыть частицы Хиггса в самом ближайшем будущем. А если Фермилаб постигнет неудача, но всё же указанная оценка диапазона массы верна, то в конце десятилетия Большой адронный коллайдер должен будет рождать частицы Хиггса в изобилии. Обнаружение частиц Хиггса явится крупной вехой, поскольку подтвердит существование поля, на которое специалисты по элементарным частицам и космологи ссылались в течение десятилетий, не имея для него никаких экспериментальных подтверждений.

Другой крупной целью как Фермилаба, так и Большого адронного

коллайдера является обнаружение суперсимметрии. Вспомним из главы 12, что идея суперсимметричных пар частиц, спины которых отличаются на половинку единицы, изначально в теории струн возникла в начале 1970-х гг. Если суперсимметрия реализуется в реальном мире, то для каждой известной частицы со спином, равным $1/2$, должна существовать частица-партнёр с нулевым спином; для каждой известной частицы со спином, равным 1, должна существовать частица-партнёр со спином, равным $1/2$. Например, в паре с электроном, обладающим спином $1/2$, должна существовать частица с нулевым спином, названная *суперсимметричным электроном* или, для краткости, *сэлектроном*; в паре с кварками, имеющими спин $1/2$, должны существовать *суперсимметричные кварки*, или *скварки*; в паре с нейтрино, имеющим спин $1/2$, должно существовать *снейтрино* с нулевым спином; в паре с глюонами, фотонами, W - и Z -частицами, обладающими спином 1, должны существовать *глюино*, *фотино*, *вино* и *зино* со спином $1/2$. (Да, физики вошли в раж).

Никто никогда не обнаруживал ни одну из таких парных частиц, и физики надеются, что причина состоит в том, что суперсимметричные частицы значительно тяжелее своих партнёров. Теоретические соображения наводят на мысль, что суперсимметричные частицы могут быть в тысячи раз тяжелее протона, и в этом случае нет ничего загадочного в том, что их до сих пор не удалось обнаружить экспериментально: у существующих ускорителей частиц просто не хватает мощности. В грядущем десятилетии это изменится. Уже у усовершенствованного ускорителя в Фермилабе есть шанс открыть некоторые из суперсимметричных частиц. И, как и в случае с частицами Хиггса, если Фермилаб постигнет неудача, то LHC с лёгкостью должен их породить, при условии, конечно, что порядок массы суперсимметричных частиц оценён достаточно точно.

Подтверждение суперсимметрии явилось бы самым важным достижением в физике элементарных частиц за более чем два десятилетия. Оно ознаменовало бы новый шаг за рамки стандартной модели физики частиц и дало бы косвенное подтверждение тому, что теория струн находится на верном пути. Но, заметьте, это не подтвердило бы саму теорию струн. Хотя суперсимметрия была открыта в ходе разработки теории струн, но физики уже давно поняли, что суперсимметрия является более общим принципом, который может быть легко включён в традиционные подходы на основе представлений о точечных частицах. Подтверждение суперсимметрии установило бы важный элемент теории струн и задало бы направление множеству последующих исследований, но

оно не явилось бы «лакмусовой бумажкой», подтверждающей справедливость теории струн.

С другой стороны, если верен сценарий мира на бране, то действительно есть возможность, что в будущих экспериментах с ускорителями будет подтверждена теория струн. Как было кратко упомянуто в главе 13, если дополнительные измерения в сценарии мира на бране достигают порядка 10^{-16} см, то не только гравитация может оказаться значительно сильнее, чем думали раньше, но и сами струны могли бы быть существенно длиннее. Такие длинные струны менее жёсткие, так что для их возбуждения требуется меньше энергии. Тогда как в стандартной теории струн моды колеблющихся струн обладают энергиями, более чем в миллион миллиардов раз превосходящими предел достижимого в наших экспериментальных установках, в сценарии мира на бране энергии мод колеблющихся струн могут лишь в тысячу раз превосходить массу протона. В таком случае высокоэнергетические столкновения в LHC окажутся сродни мячику для гольфа, влетевшему внутрь фортепьяно; в них хватит энергии для возбуждения множества «октав» гаммы колеблющихся струн. Экспериментаторы обнаружат изобилие новых, не виданных ранее частиц — т. е. новых, невиданных ранее мод колеблющихся струн, — энергии которых будут соответствовать гармоническим резонансам теории струн.

Свойства этих частиц и взаимосвязи между ними безошибочно укажут на то, что все они составляют часть одной и той же космической партитуры, что при всём своём различии они являются связанными нотами, что все они являются отдельными колебательными модами одного и того же объекта — струны. Это наиболее вероятный сценарий прямого подтверждения теории струн в обозримом будущем.

Космические истоки

Как мы уже видели, реликтовое излучение играло доминирующую роль в космологических исследованиях с момента его открытия в середине 60-х гг. XX в. Причина ясна: на ранних этапах эволюции Вселенной пространство было заполнено смесью электрически заряженных частиц — электронов и протонов, — которые посредством электромагнитного взаимодействия расшвыривали фотоны во всех направлениях. Но всего через 300 000 лет после Большого взрыва Вселенная уже достаточно остыла для того, чтобы электроны и протоны соединились в

электрически нейтральные атомы, — и начиная с этого момента излучение стало почти беспрепятственно пронизывать пространство, запечатлев чёткий снимок ранней Вселенной. Каждый кубический метр пространства пронизывает около 400 млн этих изначальных фотонов, нетронутых реликтов ранней Вселенной.

Первоначальные измерения реликтового излучения показали, что его температура на удивление однородна, но, как мы обсуждали в главе 11, при более тщательном обследовании, проведённом сначала в 1992 г. с помощью спутника COBE и с тех пор усовершенствованном в ряде наблюдений, были выявлены небольшие температурные вариации, представленные на рис. 14.4а. Данные отмечены разными оттенками серого цвета, причём наибольшая разница между самыми светлыми и самыми тёмными пятнами составляет всего лишь несколько десятитысячных долей градуса. Пятнистость рисунка указывает на мельчайшую, но неоспоримо реальную неоднородность распределения температуры излучения по всему небу.

Результаты эксперимента COBE сами по себе являются впечатляющим открытием, но они также отметили существенное изменение в характере космологических исследований. До эксперимента COBE космологические данные были грубыми. В свою очередь, космологическая теория имела право на существование, если она соответствовала этим приблизительным данным астрономических наблюдений. Теоретики могли выдвигать схему за схемой с минимальной оглядкой на ограничения, накладываемые данными наблюдений. Этих ограничений было попросту немного, а существовавшие не были особенно точными. Но эксперимент COBE положил начало новой эре, в которой стандарты значительно ужесточились. Теперь появляется всё больше точных данных, которым должна соответствовать любая теория, прежде чем с нею начнут серьёзно считаться. В 2001 г. был запущен спутник WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe — зонд для изучения реликтового излучения имени Вилкинсона), совместный венчурный проект НАСА и Принстонского университета, для измерения реликтового излучения с примерно в 40 раз большей точностью и разрешением. Сравнивая первоначальные результаты WMAP (рис. 14.4б) с результатами COBE (рис. 14.4а), можно сразу заметить, сколь более тонкую и более детальную картину может дать WMAP. Запуск другого спутника под названием «Планк» («Planck»), разрабатываемого Европейским космическим агентством (European Space Agency), намечен на 2007 г.^[92] и, если всё пойдёт по плану, он даст картину с вдесятеро лучшим разрешением, чем WMAP.

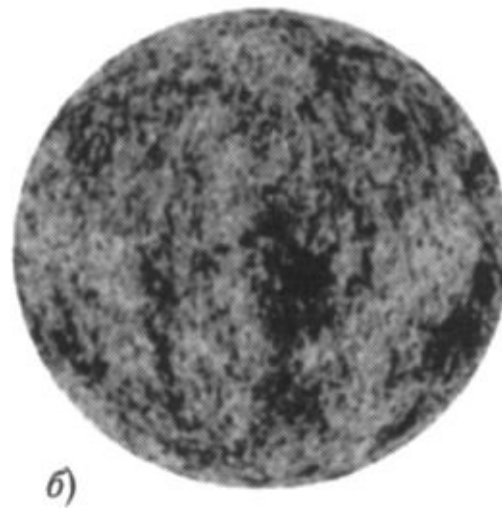
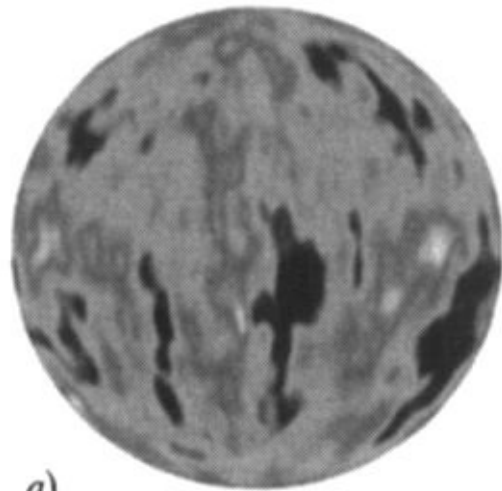


Рис. 14.4. (а) Данные по реликтовому излучению, собранные спутником COBE. Это излучение стало беспрепятственно пронизывать пространство спустя примерно 300 000 лет после Большого взрыва, так что на картинке отражены мельчайшие температурные вариации, существовавшие во Вселенной примерно 14 млрд лет тому назад. (б) Более точные данные, собранные спутником WMAP

Наплыв точных данных сузил поле космологических предположений, среди которых ведущее место, несомненно, занимает инфляционная модель. Но, как мы упоминали в главе 10, инфляционная теория является не единственным кандидатом. Теоретики предложили множество различных версий (старая инфляция, новая инфляция, тёплая инфляция,

гибридная инфляция, гиперинфляция, вспомогательная инфляция, вечная инфляция, расширенная инфляция, хаотическая инфляция, двойная инфляция, маломасштабная инфляция, гипернатуральная инфляция — и это ещё не всё), каждая из которых характеризуется кратким периодом быстрого расширения, но все они разнятся в деталях (количеством полей, формой их потенциальной энергии и т. д.). Эти различия ведут к немного разным предсказаниям свойств реликтового излучения (различные поля с различными энергиями испытывают немного разные квантовые флуктуации). Сравнение с данными спутников WMAP и «Planck» должно отсеять множество предположений, значительно улучшив наше понимание.

На самом деле эти данные могут ещё больше сузить поле предложений. Хотя квантовые флуктуации, растянутые инфляционным расширением, дают убедительное объяснение наблюдаемым температурным вариациям, но у инфляционной модели есть достойный соперник. Циклическая космологическая модель Стейнхардта и Тьюрока, описанная в главе 13, предлагает альтернативное объяснение. По мере того как две 3-браны циклической модели медленно направляются друг к другу, квантовые флуктуации вынуждают различные части бран приближаться с разной скоростью. Когда браны наконец-то сталкиваются приблизительно триллион лет спустя, то различные области бран соприкасаются немного в разные моменты времени, примерно как при соединении двух кусков шершавой наждачной бумаги. Крохотные отклонения от совершенно однородного соприкосновения порождают небольшие отклонения от совершенно однородной эволюции на каждой бране. Поскольку по предположению одна из этих бран является нашим трёхмерным пространством, то эти отклонения от однородности мы и должны обнаружить. Стейнхардт, Тьюрок и их сторонники заявили, что эти неоднородности порождают температурные отклонения той же формы, что и в инфляционной модели, и, следовательно, при сопоставлении с имеющимися сейчас данными циклическая модель даёт столь же жизнеспособное объяснение данным наблюдений.

Однако более точные данные, которые будут получены в следующее десятилетие, возможно, отсеют одну из соперничающих моделей. В инфляционной модели не только квантовые флуктуации растягиваются инфлатонным полем при экспоненциальном расширении, но в результате этого интенсивного растяжения генерируется также и мельчайшая квантовая рябь ткани пространства. Поскольку рябь пространства есть не что иное, как гравитационные волны (как в нашем недавнем обсуждении LIGO), то инфляционная модель предсказывает порождение

гравитационных волн в самые ранние моменты Вселенной.^[191] Эти волны часто называют *реликтовыми гравитационными волнами*, чтобы отличать их от волн, которые были относительно недавно сгенерированы в результате крупных астрофизических событий. В циклической же модели, наоборот, отклонение от совершенной однородности происходит медленно, в течение почти безмерного промежутка времени, поскольку у бран уходит триллион лет на медленное приближение друг к другу для следующего столкновения. Отсутствие резкого и сильного изменения геометрии бран и геометрии пространства означает, что пространственная рябь *не* генерируется, так что в циклической модели реликтовые гравитационные волны отсутствуют. Таким образом, если реликтовые гравитационные волны будут обнаружены, то это обернётся ещё одним триумфом инфляционной модели и окончательно перечеркнёт циклическую теорию.

Вряд ли чувствительности LIGO хватит на то, чтобы обнаружить гравитационные волны, предсказанные инфляционной моделью, но, возможно, их существование будет косвенно подтверждено данными «Planck» или данными другого эксперимента, названного CMBPol (Cosmic Microwave Background Polarization — космический эксперимент для изучения поляризации реликтового излучения), — этот эксперимент сейчас планируется. «Planck» и, в особенности, CMBPol не будут сосредоточены исключительно на температурных вариациях реликтового излучения; они также будут измерять *поляризацию* — среднее направление спинов обнаруживаемых фотонов реликтового излучения. Путём сложных рассуждений, которые мы здесь пропускаем, можно показать, что гравитационные волны, порождённые Большим взрывом, должны оставить особый отпечаток на поляризации реликтового излучения, и, возможно, этот отпечаток достаточно силён, чтобы его можно было измерить.

Так что в предстоящее десятилетие у нас появится возможность определить, был ли Большой взрыв на самом деле соударением и является ли наша Вселенная на самом деле 3-браной. В золотую эру космологии некоторые из этих самых сумасшедших идей могут быть действительно проверены.

Тёмная материя, тёмная энергия и будущее Вселенной

В главе 10 мы познакомились с вескими теоретическими и наблюдательными свидетельствами того, что только 5% массы Вселенной составляет известная нам материя — протоны и нейтроны (на долю

электронов приходится менее 0,05% общей массы обычной материи), тогда как 25% массы даёт тёмная материя, а 70% — тёмная энергия. Но всё ещё остаётся значительная неопределённость в том, из чего же состоит тёмная материя. Естественно предположить, что тёмная материя тоже состоит из протонов и нейтронов, которые каким-то образом избежали совместного сцепления с последующим образованием звёзд, излучающих свет. Но другой теоретический взгляд оставляет этой гипотезе очень мало шансов.

Благодаря детальным наблюдениям астрономы точно знают об относительной средней распространённости лёгких элементов (водорода, гелия, дейтерия и лития), рассеянных по всему космосу. С высокой степенью точности эта распространённость согласуется с теоретическими расчётами процессов, в ходе которых ядра этих элементов были предположительно синтезированы в первые минуты Вселенной. Эта согласованность является одним из величайших успехов современной теоретической космологии. Однако в этих расчётах предполагается, что основная часть тёмной материи состоит *не* из протонов и нейтронов; если главными составляющими на космологических масштабах были бы протоны и нейтроны, то результаты расчётов не согласовывались бы с наблюдаемыми данными.

Но если не протоны и нейтроны, тогда что же составляет тёмную материю? Сегодня никто этого не знает, но в предположениях нет недостатка. Имена кандидатов пробегают весь ряд от *аксионов* до *зино*, и тот, кто найдёт ответ, несомненно, будет приглашён в Стокгольм. То обстоятельство, что ещё никто не обнаружил частицы тёмной материи, накладывает существенное ограничение на любое предположение. Дело в том, что тёмная материя находится не только в глубоком космосе; она распределена по всей Вселенной и поэтому присутствует и здесь, на Земле. Согласно многочисленным предположениям прямо сейчас миллиарды частиц тёмной материи ежесекундно пронизывают ваше тело, так как в ряду перспективных кандидатов остаются только те частицы, которые могут проходить через материю, не оставляя заметного следа.

Одним из оставшихся кандидатов является нейтрино. По оценкам, плотность реликтовой распространённости нейтрино с момента Большого взрыва составляет 55 млн/м^3 , так что если масса одного из трёх видов нейтрино дотягивает до сотой от миллионной доли (10^{-8}) массы протона, то нейтрино могут обеспечить надлежащую массу тёмной материи. Хотя в недавних экспериментах были получены веские свидетельства того, что нейтрино действительно имеют массу, но согласно современным данным

нейтрино слишком легки, чтобы обеспечить должную массу тёмной материи — нейтрино примерно в сто раз легче, чем нужно.

Другими перспективными кандидатами являются суперсимметричные частицы, особенно, *фотино*, *зино* и *хиггсино* (партнёры фотона, Z-частицы и частицы Хиггса соответственно). Они самые «нелюдимые» из всех суперсимметричных частиц — они могли бы невозмутимо проходить через всю Землю без малейшего влияния на своё движение — и поэтому могли бы легко избегать своего обнаружения.^[192] Из расчётов количества этих частиц, порождённых Большим взрывом и доживших до настоящих дней, следует, что их масса должна от 100 до 1000 раз превышать массу протона, чтобы набрать должную массу тёмной материи. Это интригующий результат, поскольку в различных моделях суперсимметричных частиц, как и в теории суперструн, получена та же оценка массы без какой-либо оглядки на тёмную материю и космологические процессы. Это было бы загадочным и совершенно необъяснимым совпадением, если, конечно, тёмная материя действительно не состоит из суперсимметричных частиц. Таким образом, поиск суперсимметричных частиц в современных и строящихся ускорителях частиц может также считаться поиском наиболее подходящих кандидатов на роль тёмной материи.

С некоторых пор уже ведутся и прямые поиски частиц тёмной материи, проносящихся через Землю, хотя такие эксперименты чрезвычайно трудны. Из примерно миллиона частиц тёмной материи, которые должны ежесекундно проходить через площадь размером примерно с 25-центовую монетку, в лучшем случае только одна может оставить какой-либо след в экспериментальной установке, специально построенной для их обнаружения. До сих пор не было подтверждённых обнаружений частиц тёмной материи.^[193] Имея перед собой цель, всё ещё парящую вдалеке, исследователи настойчиво продвигаются вперёд. Вполне возможно, что в течение следующих нескольких лет будет установлено, из чего же состоит тёмная материя.

Окончательное подтверждение существования тёмной материи и прямое определение её состава явилось бы крупным достижением. Впервые в истории мы узнали бы о чём-то основополагающем и одновременно удивительно ускользающем: о составе большей части материального содержимого Вселенной.

Но всё же, как мы видели в главе 10, недавние результаты определённо указывают на то, что помимо тёмной материи остаётся ещё кое-что не менее важное, требующее экспериментальной проверки: наблюдения за

сверхновыми свидетельствуют в пользу космологической постоянной, на долю которой приходится 70% полной энергии во Вселенной. Как самое волнующее и неожиданное открытие за последнее десятилетие, это свидетельство в пользу космологической постоянной — энергии, заполняющей пространство, — требует решительного и надёжного подтверждения. С этой целью тоже запланирован или уже осуществляется целый ряд проектов.

Эксперименты, относящиеся к реликтовому излучению играют важную роль и здесь. Размер пятен на рис. 14.4 (где, напомним, каждое пятно соответствует области одинаковой температуры) отражает форму ткани пространства. Если бы пространство имело сферическую форму, как на рис. 8.6а, то выпуклость пространства сделала бы пятна более крупными, чем на рис. 14.4б; если бы пространство имело седлообразную форму, как на рис. 8.6в, пятна были бы несколько меньше; а если пространство плоское, как на рис. 8.6б, то размер пятен имеет промежуточное значение между двумя упомянутыми выше случаями. Точные измерения, выполненные COBE, а затем улучшенные WMAP, веско подтверждают предположение, что пространство *плоское*. Это не только соответствует теоретическим ожиданиям, исходящим из инфляционных моделей, но и полностью согласуется с результатами наблюдений сверхновых звёзд. Как мы видели, в плоской Вселенной требуется, чтобы общая плотность материи/энергии равнялась критической плотности. Все данные впечатляюще согласуются друг с другом при вкладе обычной и тёмной материи около 30%, и вкладе тёмной энергией около 70%.

Более прямое подтверждение результатов по сверхновым является целью исследований, проводимых с помощью спутника SNAP (SuperNova/Acceleration Probe — спутник для изучения сверхновых и расширения Вселенной), предложенного учёными Лоуренсовской лаборатории в Беркли (Lawrence Berkeley Laboratory). SNAP будет представлять собой орбитальный спутниковый телескоп, способный измерять в 20 раз больше сверхновых, чем в земных обсерваториях. SNAP в состоянии не только подтвердить предыдущие результаты о том, что 70% приходится на долю тёмной энергии, но также он должен оказаться способным точнее определить природу тёмной энергии.

Вы видите, хотя я описал тёмную энергию как одну из версий космологической постоянной Эйнштейна — постоянной, неизменной энергии, заставляющей пространство постоянно расширяться, — но есть и тесно связанная альтернативная возможность. Вспомним из обсуждения инфляционной космологии (и прыгающей лягушки), что поле, величина

которого держится на уровне, превосходящем уровень самого низкого энергетического состояния, может действовать подобно космологической постоянной, вызывая ускоренное расширение пространства, но обычно оно способно на это только в течение короткого промежутка времени. Рано или поздно поле займёт своё место на дне энергетической чаши, и его расталкивающее действие исчезнет. В инфляционной космологии это происходит за крошечную долю секунды. Но за счёт введения нового поля и тщательного подбора формы его энергетической чаши физики нашли способ, как сделать ускоренное расширение гораздо более мягким и длящимся гораздо дольше — чтобы поле вызывало относительно медленное и равномерное расширение пространства, длящееся не доли секунды, а миллиарды лет, по мере того как поле очень медленно скатывается в состояние с наименьшей энергией. Это открывает возможность, что прямо сейчас мы можем переживать чрезвычайно мягкую версию инфляционного взрыва, который имел место в самые ранние моменты истории Вселенной.

Это различие между настоящей космологической постоянной и последней возможностью, известной как *квинтэссенция*, имеет минимальное значение сегодня, но влечёт чрезвычайные последствия для далёкого будущего Вселенной. Космологическая постоянная *постоянна* — она обеспечивает нескончаемое расширение, так что Вселенная будет всё быстрее расширяться и будет становиться всё более разреженной и пустой. Но в концепции квинтэссенции ускоренное расширение рано или поздно закончится, так что будущее рисуется менее безрадостным и пустынным, чем при вечном ускоренном расширении. Фиксируя изменения в ускорении расширения пространства за отдалённые промежутки времени (посредством наблюдения сверхновых, удалённых от нас на различные расстояния и, следовательно, на различные временные эпохи), SNAP, может быть, поможет выделить верный вариант. Определив, представляет ли тёмная энергия действительно постоянную величину — космологическую постоянную, — SNAP позволит заглянуть в очень отдалённое будущее Вселенной.

Пространство, время и предположения теории

Наше путешествие к раскрытию природы пространства и времени было долгим и насыщенным множеством сюрпризов; несомненно, мы ещё только в начале пути. За несколько последних столетий мы были

свидетелями цепочки прорывов, каждый из которых радикально менял наши представления о пространстве и времени. Теоретические и экспериментальные предложения, рассмотренные в данной книге, отражают идеи и взгляды нашего поколения; вероятно, большая их часть войдёт в наше научное наследие. В главе 16 мы обсудим некоторые из самых недавних теоретических достижений в попытке пролить свет на то, что может оказаться следующими шагами нашего путешествия. Но сначала, в главе 15, посмотрим в другом направлении.

Хотя нет и не может быть никаких правил научных открытий, но история показывает, что глубокое понимание часто ведёт к новым технологическим достижениям. Изучение электромагнитного взаимодействия в XIX в. в конечном счёте привело к изобретению телеграфа, радио и телевидения. Объединив это знание с последующими прорывами в области квантовой механики, мы смогли создать компьютеры, лазеры и самые разнообразные электронные устройства, которым не счесть числа. Понимание ядерных сил привело к опасному овладению самым мощным оружием, которое когда-либо знал мир, а также к развитию технологий, которые в перспективе могли бы удовлетворить энергетические потребности всего мира с помощью всего лишь цистерн солёной воды. Станет ли наше всё углубляющееся понимание пространства и времени первым шагом аналогичной цепочки открытий и технологических достижений? Овладеем ли мы когда-нибудь пространством и временем и достигнем ли того, что пока является уделом лишь научной фантастики?

Никто не знает этого. Но давайте сейчас оценим, как далеко мы зашли и что это может повлечь за собой.

Глава 15. Телепортация и машины времени

Путешествие сквозь пространство и время

Возможно, мне просто не хватало воображения в далёких 1960-х гг., но самой невероятной вещью мне тогда казался компьютер на борту «Энтерпрайза» из сериала «Звёздный Путь». Я был учеником начальной школы и мог спокойно допустить, что когда-нибудь будут созданы двигатели, позволяющие почти мгновенно преодолевать громадные космические расстояния, и меня не удивляла Вселенная, населённая инопланетянами, бегло говорящими по-английски. Но чтобы машина могла по запросу выводить изображение какой угодно исторической личности, предоставлять технические спецификации для любого оборудования или текст какой угодно книги из когда-либо написанных? Именно в *это* я отказывался верить. В конце 1960-х гг. подросток в моём лице был уверен, что никогда не будет найден способ собирать, хранить и предоставлять быстрый доступ к такому богатству информации. И всё же, менее полувека спустя, я сижу на кухне с ноутбуком, снабжённым беспроводным доступом в Интернет и программой распознавания речи, и играю роль капитана Кирка, листая обширные хранилища знаний — от капитальных до несерьёзных — не пошевелив и пальцем. Конечно, наши компьютеры ещё проигрывают в скорости и эффективности вымышленным компьютерам XXIII в. из мира «Звёздного Пути», но легко представить, что через двести лет наши технологии превзойдут всяческие ожидания.

Этот пример стал одним из избитых штампов для иллюстрации возможности научной фантастики предсказывать будущее. Но что может быть соблазнительней такой машины: вы входите в помещение, щёлкаете переключатель и мгновенно переноситесь в далёкое место или другое время? Возможно, однажды мы освободимся от ограничений на пространство и время, к которым мы были так долго привязаны, и познаем дальние пределы пространств и времён? Или же такая возможность навсегда останется уделом научной фантастики? Уличив меня в детской неспособности предвидеть информационную революцию, вы можете усомниться в моей способности предсказывать будущие технологические прорывы. Поэтому вместо размышлений о вероятности того, что может быть, в этой главе я расскажу, как далеко мы уже продвинулись, как в теории, так и на практике, в направлении реализации телепортации и машины времени, и что понадобится для дальнейшего продвижения и

овладения контролем над пространством и временем.

Телепортация в квантовом мире

В общепринятых описаниях научной фантастики *телепортер* (или *транспортёр* — на сленге «Звёздного Пути») сканирует объект и определяет его строение, а затем посылает эту информацию в удалённое место, где и воссоздаётся этот объект. В одних научно-фантастических произведениях сам объект «дематериализуется» и его атомы и молекулы посылаются вместе с информацией для последующей сборки, в других же произведениях создаётся точная копия объекта из атомов и молекул, находящихся в «приёмнике» телепортера. Научный подход к телепортации, развитый за последнее десятилетие, ближе по духу ко второму варианту, что сразу же влечёт два существенных вопроса. Первый вопрос представляет собой стандартную, но трудную философскую головоломку: когда, если вообще когда-либо, точная копия должна идентифицироваться с оригиналом и рассматриваться как оригинал? Второй вопрос заключается в том, возможно ли, даже в принципе, полностью определить строение и состав объекта так, чтобы затем можно было создать «шаблон», по которому можно было бы точно восстановить объект?

Во Вселенной, подчиняющейся законам классической физики, ответ на второй вопрос был бы положительным. Параметры каждой частицы, составляющей объект (её тип, положение, скорость и т. д.), в принципе можно абсолютно точно измерить, а затем передать эту информацию в удалённое место, чтобы воссоздать по ней сам объект. Сделать подобное для объекта, состоящего больше чем из горстки элементарных частиц, видится невероятно сложной задачей, но в классической Вселенной эта задача в принципе разрешима — всё упирается только в сложность.

Во Вселенной, подчиняющейся законам квантовой физики, — нашей Вселенной — ситуация гораздо более тонкая. Мы знаем, что акт измерения вынуждает ряд параметров объекта выплыть из «квантового тумана» и принять определённые значения. Например, когда мы наблюдаем частицу, то измеренные нами параметры не отражают неопределённую квантовую смесь атрибутов, которую она имела до нашего наблюдения.^[194] Таким образом, если мы хотим скопировать объект, мы попадаем в порочный квантовый круг. Чтобы скопировать, мы должны наблюдать, чтобы знать, что копировать. Но сам акт наблюдения вносит изменения, так что если мы копируем то, что видим, то мы копируем не то, что было до нашего

наблюдения. Отсюда можно прийти к заключению, что телепортация в квантовом мире невозможна, но не просто из-за практических ограничений, вытекающих из сложности одновременного измерения всех параметров гигантского количества объектов, а в силу фундаментальных ограничений, отражающихся в квантовой физике. Тем не менее, как мы увидим в следующем разделе, в начале 1990-х гг. международная группа физиков нашла искусный способ обойти это препятствие.

Что касается первого вопроса по поводу взаимосвязи между копией и оригиналом, квантовая физика даёт точный и ободряющий ответ. Согласно квантовой механике все электроны во Вселенной идентичны друг другу в том смысле, что все они обладают одной и той же массой, одним и тем же электрическим зарядом, одними и теми же характеристиками слабого и сильного взаимодействия и одним и тем же полным спином. Более того, согласно основательно проверенному утверждению квантовой механики только что приведённый перечень *исчерпывает* все характеристики электрона; электроны идентичны по отношению к этим характеристикам, а других существенных характеристик просто нет. В том же смысле идентичны все *u*-кварки, идентичны все *d*-кварки, идентичны все фотоны и т. д. — данное утверждение справедливо для всех типов частиц. Как было установлено ещё много десятилетий тому назад, частицы также можно рассматривать как наименьшие «пакеты» поля (например, фотоны — наименьшие пакеты электромагнитного поля), и квантовая физика показывает, что такие мельчайшие составляющие одного и того же поля всегда идентичны. (Или, согласно представлению теории струн, частицы одного типа имеют идентичные характеристики из-за того, что являются идентичными вибрациями струны всего одного типа.)

Частицы одного типа могут отличаться лишь вероятностями их обнаружения в том или ином месте, вероятностями ориентации спина в том или ином направлении и вероятностями обладания конкретными скоростями и энергиями. Или, как лаконично говорят физики, частицы могут находиться в различных *квантовых состояниях*. Но если две частицы одного типа находятся в одном и том же квантовом состоянии (за исключением, возможно, того, что у одной частицы выше вероятность быть *здесь*, а у другой — *там*), то законы квантовой механики гарантируют, что частицы неразличимы, причём не только практически, но и в принципе. Они — совершенные близнецы. Если бы кто-то поменял частицы местами (точнее, поменял их вероятности быть в том или ином месте), то никто бы не смог определить, что частицы переставлены.

Таким образом, если кто-то вводит частицу, находящуюся в

отдалённом месте,^[93] точно в то же квантовое состояние, какое имеет частица того же типа, находящаяся здесь, то отдалённая частица будет неотличима от своего оригинала, и этот процесс можно по праву назвать квантовой телепортацией. Конечно, если бы этот процесс никак не затронул оригинальную частицу, то вы могли бы назвать его квантовым клонированием или, возможно, квантовым копированием на расстоянии. Но, как мы увидим, при научной реализации этих идей затрагивается оригинальная частица — её квантовое состояние неизбежно меняется в ходе процесса телепортации, — так что мы не столкнёмся с таксономической дилеммой.

Более насущен вопрос (внимательно рассматривавшийся философами в той или иной форме), верно ли для агломерата частиц то, что верно для одной частицы? Если бы вы сподобились телепортировать из одного места в другое каждую частицу, составляющую ваш «ДеЛориан»^[94], гарантируя, что квантовое состояние каждой частицы, включая её взаимосвязи со всеми другими частицами, воспроизведено со 100%-й точностью, то означало бы это, что вам удалось телепортировать свой автомобиль? Хотя у нас нет никаких эмпирических данных, но теоретические соображения определённо говорят в пользу возможности телепортации автомобиля. Атомное и молекулярное строение определяет всё восприятие автомобиля: как он выглядит, как звучит, как пахнет и даже какой он на вкус, так что скопированный автомобиль должен быть полностью идентичен оригинальному «ДеЛориану» — со всеми своими неровностями, царапинами, скрипучей левой дверью, запахом, оставленным вашей собакой, и прочим. Он должен брать резкий поворот и реагировать на нажатие педали газа точно так же, как оригинал. Нас не заботит, действительно ли перед нами оригинал или его идеальная копия. Если бы вы попросили Объединённые квантовые транспортные линии^[95] доставить по морю ваш автомобиль из Нью-Йорка в Лондон, а компания, без вашего ведома, телепортировала бы ваш автомобиль указанным выше образом, то вы никогда не нашли бы разницы — даже в принципе.

Но что если транспортная компания проделала бы то же самое с вашим котом? Или, питая отвращение к пище, предлагаемой на борту самолёта, вы решились бы на собственную телепортацию? Будет ли кот или человек, вышедший с другого конца телепортера, тем же самым, кто вошёл в телепортер? Лично я так и думаю. Опять же, поскольку у нас нет соответствующих данных, в лучшем случае мы можем лишь рассуждать. По моему мнению, живое существо, атомы и молекулы которого находятся

точно в том же квантовом состоянии, что и мои, *есть я*. Даже если бы «оригинал» меня остался бы после «копирования», я (мы) без колебания бы сказал, что и «копия», и «оригинал» — это я сам. Ни один из «нас» не будет иметь приоритета над другим. Мысли, память, эмоции и суждения имеют физическое основание в атомных и молекулярных характеристиках человеческого тела; идентичное квантовое состояние элементарных составляющих должно влечь за собой идентичное сознательное существо. С течением времени мы стали бы различаться из-за различного опыта, но я действительно верю, что с момента «копирования» будет «два меня», а не то, что «оригинал» — каким-либо образом «настоящий я», а «копия» в чём-то поддельна.

В действительности я хочу даже несколько ослабить требования. Наше физическое строение всё время постоянно меняется — иногда чуть-чуть, иногда значительно, — но каждый из нас остаётся одной и той же личностью. От мороженого Haagen-Dazs^[96], наводняющего кровотоки жиром и сахаром, до магнитно-резонансного томографа, поворачивающего спиновые оси ядер различных атомов мозга, до сердечных трансплантатов и липосакции, до триллионов атомов, заменяющихся каждую миллионную долю секунды в человеческом теле, мы подвержены постоянным изменениям, и всё же наша личная идентичность остаётся неизменной. Так что даже если телепортировавшееся существо не абсолютно точно будет воспроизводить моё физическое состояние, оно ещё может оставаться полностью неотличимым от меня. В меру моего понимания, оно могло бы *быть* мной.

Конечно, если вы верите в то, что жизнь, и в особенности сознательная жизнь, включает в себя ещё какую-то сущность помимо физической организации, то ваши критерии успешной телепортации будут строже моих. Эта мудрёная проблема — до какой степени наша идентификация как личности привязана к нашему физическому существу? — обсуждалась годами, но так и не было найдено ответа, который удовлетворил бы всех и каждого. Хотя лично я верю, что вся идентификация зависит только от физического, но другие не согласятся со мной, и никто не сможет привести убедительных доказательств правоты своей точки зрения.

Но безотносительно к вашей точке зрения на гипотетическую проблему телепортации живого существа учёные уже установили, что благодаря чудесам квантовой механики *отдельные частицы могут быть телепортированы — и были телепортированы*. Давайте посмотрим, как.

Квантовое запутывание и квантовая телепортация

В 1997 г. сразу две группы — группа физиков под руководством Антона Цайлингера, работавшего тогда в университете Инсбрука, и другая группа под руководством А. Франческо Де Мартини из университета Рима^{195} — осуществили первую успешную телепортацию одного фотона. В обоих экспериментах начальный фотон в определённом квантовом состоянии был телепортирован на короткое расстояние в пределах лаборатории, но есть все основания полагать, что использованные методики сработают на любом расстоянии. Каждая группа использовала метод, основанный на теоретических соображениях, приведённых в 1993 г. группой физиков — Чарльзом Беннетом из Исследовательского центра IBM имени Томаса Ватсона; Жилем Брассаром, Клодом Крепо и Ричардом Джозой из университета Монреалья; израильским физиком Ашером Пересом и Вильямом Вуттерсом из Вильямсовского колледжа, — которые опирались на квантовое запутывание (глава 4).

Вспомним, что две запутанные частицы, скажем, два фотона, имеют необычную тесную взаимосвязь. Хотя каждая из таких частиц лишь с некоторой вероятностью имеет тот или иной спин и хотя при измерении каждая из частиц случайным образом «выбирает» конкретное значение спина, но каким бы ни был «выбор» одной частицы, вторая тотчас же делает тот же «выбор», невзирая на расстояние между частицами. В главе 4 мы уяснили, что невозможно использовать запутанные частицы для посылки сообщения из одного места в другое со скоростью, превышающей скорость света. Если последовательность пар запутанных фотонов измерить в далеко отдалённых друг от друга местах, то данные, снятые с каждого детектора, будут случайным набором величин (в котором частота получения того или иного результата согласуется с волной вероятности частиц). Запутывание станет явным лишь при сравнении двух наборов данных, когда обнаружится, что эти наборы идентичны. Но для сравнения требуется какая-либо обычная связь со скоростью, меньшей скорости света. А поскольку до проведения сравнения никак невозможно обнаружить запутывание, то невозможно послать сигнал со скоростью, превышающей скорость света.

Тем не менее, хотя запутывание невозможно использовать для сверхсветовых сообщений, но остаётся стойкое ощущение, что дальнодействующие корреляции между частицами столь странны, что их можно как-то использовать для чего-то экстраординарного. В 1993 г. Беннет

со своими сотрудниками обнаружил одну такую возможность. Они показали, что квантовое запутывание можно использовать для квантовой телепортации. Вы не сможете послать сигнал со скоростью, превосходящей скорость света, но если вы собираетесь осуществить телепортацию частицы со скоростью, меньшей скорости света, то квантовое запутывание — то, что нужно.

И осуществить это можно весьма оригинальным способом. Вот как это делается.

Представим, что я хочу телепортировать конкретный фотон — назовём его фотоном A — из своего дома в Нью-Йорке своему другу Николасу в Лондон. Ради простоты проследим только за спином фотона — посмотрим, как можно точно телепортировать квантовое состояние спина фотона, т. е. как Николасу получить фотон с тем же распределением вероятности спина по осям, как и у моего фотона A .

Я не могу просто измерить спин фотона A , а затем позвонить Николасу и сказать, что ему сделать со своим фотоном, чтобы его спин соответствовал моим наблюдениям; на результат, который я получил, оказало бы влияние проведённое мной измерение, и поэтому он не будет отражать истинное состояние фотона A до измерения. Так что же делать? Выход предлагает Беннетт со своими коллегами: прежде всего, нам с Николасом надо иметь по дополнительному фотону (назовём их фотонами B и C), которые составляют вместе пару запутанных фотонов. Не важно, как мы добудем такие фотоны. Просто допустим, что мы с Николасом уверены в том, что хотя нас разделяет Атлантический океан, но если я измерю спин своего фотона B относительно одной из осей, а Николас — спин своего фотона C относительно той же оси, то наши результаты совпадут.

Затем, согласно Беннетту с сотрудниками, *не следует* напрямую измерять спин фотона A (того фотона, который я собираюсь телепортировать), поскольку это обернётся слишком сильным вмешательством. Вместо этого мне следует измерить некую *совместную* характеристику фотонов A и B . Например, квантовая теория позволяет мне определить, обладают ли фотоны A и B одинаковым спином относительно вертикальной оси, не измеряя спин каждого фотона по отдельности. Аналогично, квантовая теория позволяет определить, обладают ли фотоны A и B одинаковым спином относительно горизонтальной оси, не измеряя спин каждого фотона по отдельности. Выполнив такое совместное измерение, я не узнаю спин фотона A , но зато узнаю, как спин фотона A связан со спином фотона B . Это важная информация, и вот почему.

Удалённый фотон *C* запутан с фотоном *B*, поэтому, зная о связи фотонов *A* и *B*, я могу вывести, как фотон *A* связан с фотоном *C*. Если я теперь передам по телефону эту информацию Николасу, он сможет определить, что нужно сделать с фотоном *C*, чтобы его квантовое состояние точно соответствовало фотону *A*. Прделав необходимые манипуляции, он получит у себя фотон *C*, квантовое состояние которого будет идентично моему фотону *A*, а именно это и требуется, чтобы заявить, что фотон *A* был успешно телепортирован из Нью-Йорка в Лондон. Например, в простейшем случае, когда спин фотона *B* оказывается идентичным спину фотона *A*, тогда и спин фотона *C* оказывается идентичным спину фотона *A*, и уже больше ничего не нужно делать для телепортации. Фотон *C* будет находиться в том же квантовом состоянии, что и фотон *A*, что и требовалось.

Всё почти так. Такова идея в общих чертах, и ради простоты изложения я намеренно опустил кое-что необычайно важное. Сейчас я восполню этот пробел. Проводя совместное измерение фотонов *A* и *B*, я действительно узнаю о связи спинов этих фотонов. Но, как и любое наблюдение, такое измерение тоже воздействует на фотоны. Поэтому я *не* узнаю, как спины фотонов *A* и *B* были связаны до измерения. Вместо этого я узнаю, как они связаны после того, как сам акт измерения уже повлиял на них. Так что на первый взгляд кажется, что мы сталкиваемся с той же проблемой, как и при непосредственном измерении спина фотона *A*: в обоих случаях квантовое состояние фотона *A* меняется после измерения. И вот где к нам приходит на выручку фотон *C*. Поскольку фотоны *B* и *C* запутаны, то любое воздействие на фотон *B* в Нью-Йорке *отразится на состоянии фотона C в Лондоне*. Такова удивительная природа квантового запутывания, как мы обсуждали в главе 4. И действительно, Беннетт с сотрудниками математически показали, что благодаря запутыванию с фотоном *B* искажение, вносимое измерением, *отпечатывается на удалённом фотоне C*.

И вот что чрезвычайно интересно. Посредством измерения мы можем узнать, как связаны спины фотонов *A* и *B*, но сам процесс измерения влияет на оба фотона. Однако благодаря квантовому запутыванию это измерение влияет и на фотон *C* (даже если фотон *C* находится в тысячах километров от *A* и *B*), и это позволяет нам изолировать эффект влияния и тем самым получить информацию, обычно теряющуюся в процессе измерения. Если я теперь сообщу Николасу результат своего измерения, то он узнает, как связаны спины фотонов *A* и *B* после измерения, и через фотон *C* он получит *доступ к результату влияния самого измерения*. Это позволит Николасу

использовать фотон *C* для того, чтобы, грубо говоря, вычесть влияние измерения и таким путём обойти препятствие, мешавшее копированию состояния фотона *A*. В действительности, Беннетт с сотрудниками детально показали, как путём простой манипуляции со спином фотона *C* (на основе информации о связи спинов фотонов *A* и *B*) Николас может гарантированно сделать так, чтобы квантовое состояние фотона *C* в точности воспроизводило состояние фотона *A* до измерения. Пока речь шла только о спине, но и другие характеристики квантового состояния фотона *A* (такие как вероятность нахождения на том или ином энергетическом уровне) могут быть скопированы аналогичным образом. Таким образом можно телепортировать фотон *A* из Нью-Йорка в Лондон.^{196}

Как видно, квантовая телепортация включает в себя два этапа, на каждом из которых передаётся важная информация. Сначала мы выполняем совместное измерение фотона, предназначенного для телепортации, с фотоном из пары сцепленных фотонов. Изменение квантового состояния, связанное с актом измерения, благодаря квантовой нелокальности отпечатывается на удалённом партнёре из пары сцепленных фотонов. Таков первый этап — «квантовая часть» процесса телепортации. На втором этапе результат самого измерения сообщается по любому обычному каналу связи (телефон, факс, электронная почта...) — это «классическая часть» процесса телепортации. Комбинация этих двух этапов позволяет точно воспроизвести квантовое состояние фотона, предназначенного для телепортации, путём несложной операции (такой как вращение на некоторый угол вокруг определённой оси), применяемой к удалённому партнёру пары сцепленных фотонов.

Отметим две характерные черты квантовой телепортации. Поскольку начальное состояние фотона *A* было нарушено в ходе измерения, то *только фотон C теперь находится в том начальном состоянии*. Нет двух копий исходного фотона *A*, так что этот процесс точнее назвать квантовой телепортацией, а не квантовым копированием.^{197} Более того, хотя мы телепортировали фотон *A* из Нью-Йорка в Лондон (и фотон в Лондоне стал неотличим от того фотона, который был в Нью-Йорке), но мы так и не узнали квантовое состояние фотона *A*. Фотон *A* в Лондоне обрёл ту же самую вероятность обладания спином относительно того или иного направления, какую имел фотон *A* до моего вмешательства, но мы не знаем, какова эта вероятность. Таков трюк, лежащий в основании квантовой телепортации. Возмущение, вызываемое актом измерения, препятствует нам узнать квантовое состояние фотона *A*, но в описанном подходе *нам и не*

нужно знать квантовое состояние фотона, чтобы телепортировать его. Нам требуется знать, лишь один аспект его квантового состояния — то, что мы узнаем из совместного измерения с фотоном *B*. Квантовое запутывание с удалённым фотоном *C* предоставляет недостающую информацию для успешной телепортации фотона.

Осуществление этой стратегии квантовой телепортации явилось очень непростым делом. В начале 1990-х гг. пару запутанных фотонов можно было породить с помощью стандартной процедуры, но ещё никто никогда не осуществлял совместное измерение двух фотонов (описанное выше совместное измерение фотонов *A* и *B*, называемое *измерением состояния Белла*). Заслуга групп Цайлингера и Де Мартини состоит в том, что они разработали оригинальную экспериментальную методику совместного измерения и реализовали её в лабораторных условиях.^[198] В 1997 г. они достигли своей цели, став первыми группами, осуществившими телепортацию одной частицы.

Практическая телепортация

Поскольку мы с вами, автомобиль «ДеЛориан» и всё остальное состоит из множества частиц, то следующим естественным шагом будет представить, как применить квантовую телепортацию к такой крупной совокупности частиц, что позволило бы перебрасывать макроскопические объекты из одного места в другое. Однако переход от телепортации одной частицы к телепортации макроскопической совокупности частиц сразу же ставит в тупик и находится далеко за пределами того, что многим исследователям представляется достижимым даже в отдалённом будущем. Но ради забавы представим себе, как могли бы осуществиться фантастические мечты Цайлингера.

Вообразим, что я хочу телепортировать свой «ДеЛориан» из Нью-Йорка в Лондон. Вместо пары сцепленных фотонов (необходимых для телепортации одного фотона) нам с Николасом потребуется по целому вместительному контейнеру частиц, содержащему достаточно протонов, нейтронов, электронов и т. д. для воссоздания «ДеЛориана», причём частицы в наших контейнерах должны быть попарно запутаны друг с другом (см. рис. 15.1). Мне также потребуется устройство для совместного измерения всех частиц, составляющих «ДеЛориан», с частицами, снующими туда-сюда в моём контейнере (аналог прибора для совместного измерения фотонов *A* и *B*). Благодаря запутыванию частиц в двух камерах

воздействие проведённого мною совместного измерения отпечатается в частицах, находящихся в камере Николаса в Лондоне (аналог того, как совместное измерение фотонов *A* и *B* отражается на фотоне *C*). Если я позвоню Николасу и сообщу ему результаты своего измерения (это будет дорогой звонок, так как мне потребуется передать 10^{30} результатов), то переданные мною данные скажут, какие манипуляции ему следует провести с частицами в своём контейнере (во многом подобно тому как я раньше передавал ему данные для манипуляции с фотоном *C*). Когда он закончит эти манипуляции, каждая частица в его контейнере окажется точно в том же квантовом состоянии, как каждая частица «ДеЛориана» (до того, как я провёл измерение), и так Николас *получит* «ДеЛориан». ^[97] Тем самым будет осуществлена телепортация из Нью-Йорка в Лондон.

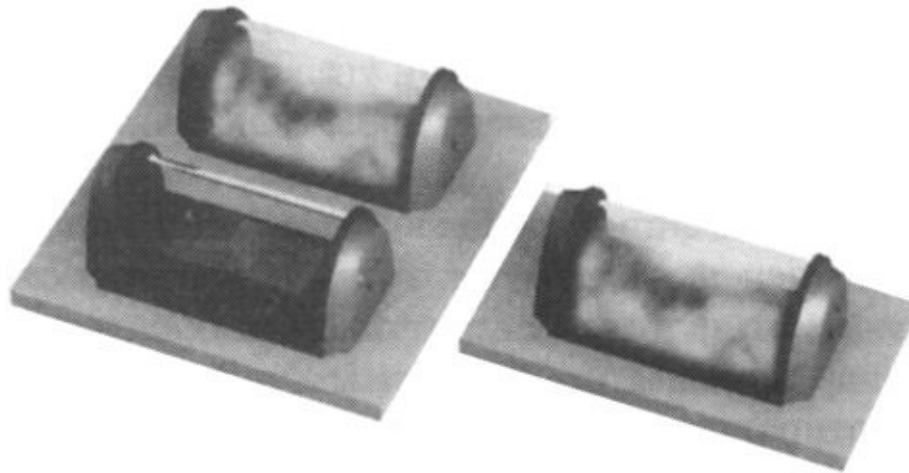


Рис. 15.1. Фантастический проект телепортации включает в себя два отдалённых друг от друга контейнера с попарно квантово запутанными частицами, а также устройство для совместного измерения частиц телепортируемого объекта с частицами одного из контейнеров. Результаты этих измерений затем дадут информацию, необходимую для манипулирования частицами второго контейнера с целью репликации объекта, — тем самым будет осуществлена его телепортация

Однако заметим, что каждый шаг этой макроскопической версии квантовой телепортации фантастичен. Объекты типа «ДеЛориана» имеют свыше миллиарда миллиардов миллиардов частиц. Хотя в экспериментах удаётся манипулировать с более чем одной парой сцепленных частиц, но эти эксперименты чрезвычайно далеки от того, чтобы набрать число

частиц, характерное для макроскопических объектов.^{199} Создание двух контейнеров сцепленных частиц находится далеко за пределами современных возможностей. Более того, совместное измерение даже двух фотонов явилось впечатляющим достижением. Сегодня даже невозможно вообразить совместное измерение миллиардов и миллиардов частиц. По современной беспристрастной оценке, можно заявить, что пройдут целые эпохи (если не вечность), прежде чем станет возможной телепортация макроскопического объекта — по крайней мере способом, описанным выше применительно к одной частице.

Но поскольку наука и техника постоянно отодвигает границы невозможного, я просто отмечу очевидное: телепортация макроскопических тел выглядит маловероятной. Но, как знать? Сорок лет назад компьютер «Энтерпрайза» тоже казался маловероятным.^{200}

Загадки путешествия во времени

Несомненно, наша жизнь была бы другой, если телепортация была бы столь же простым делом, как почтовая пересылка или поездка на метро. Стали бы возможными невероятные путешествия, и само понятие путешествия в пространстве изменилось бы до такой степени, что скачок в удобстве и практичности привёл к фундаментальному изменению во взгляде на мир.

Но всё же воздействие телепортации на наше ощущение Вселенной было бы лишь бледной тенью по сравнению с тем переворотом, который вызвала бы возможность путешествия во времени. Всем известно, что при достаточном усилии и стремлении можно добраться, по крайней мере в принципе, в желаемую точку пространства. Хотя и существуют технологические ограничения на наши путешествия в пространстве, мы всё же путешествуем, хотя и в рамках этих ограничений, руководствуясь своим выбором и своими желаниями. Но как добраться из «сейчас» в «тогда»? Наш опыт определённо свидетельствует, что для этого существует только один маршрут: мы должны ждать — секунда за секундой, пока не наступит это «тогда». И это предполагает, что «тогда» следует за «сейчас». Если «тогда» предшествует «сейчас», то опыт говорит, что такого маршрута вообще не существует; путешествие в прошлое представляется невозможным. В отличие от путешествия в пространстве, путешествие во времени кажется чем угодно, но только не делом выбора и желания. Когда речь заходит о времени, нас тащит в одном направлении, хотим мы этого

или нет.

Если бы мы могли путешествовать во времени столь же легко, как мы путешествуем в пространстве, наш взгляд на мир не просто бы изменился, а претерпел бы самый резкий сдвиг за всю историю нашего вида. Ввиду такого несомненного потрясения я часто поражаюсь тому, сколь мало людей осознают, что теоретические основы одного из видов путешествий во времени — путешествия в будущее — были заложены ещё в начале прошлого века.

Открыв природу пространства-времени в своей специальной теории относительности, Эйнштейн обрисовал схему перемещения в будущее. Если вы хотите увидеть, как будет выглядеть Земля через 1000, 10 000 или 10 млн лет, обратитесь к законам эйнштейновской физики, говорящим, как это сделать. Надо построить космический корабль, способный достигнуть скорости, скажем, 99,9999999996% от скорости света. Разогнавшись до этой скорости, вы несётесь в открытом космосе день, десять дней или чуть больше двадцати семи лет согласно вашим корабельным часам, а затем внезапно поворачиваете и летите к Земле, опять же, на предельной скорости. Когда вы вернётесь, на Земле пройдёт 1000, 10 000 или 10 млн лет. Таково бесспорное и экспериментально проверенное предсказание замедления времени с ростом скорости, о чём мы говорили в главе 3.^[201] Конечно, поскольку мы очень далеки от того, чтобы строить космические корабли, развивающие такую скорость, то никто буквально не проверял эти предсказания. Но, как мы рассказывали ранее, замедление времени было проверено на коммерческих авиарейсах, скорость которых составляет лишь мельчайшие доли скорости света, а также на элементарных частицах, подобных мюонам, разгоняемым на ускорителях до скоростей, близких к скорости света (покоящиеся мюоны распадаются на другие частицы за две миллионные доли секунды, но чем быстрее они движутся, тем медленнее идёт их внутреннее время и тем дольше они живут с нашей точки зрения). Есть все основания полагать (и нет ни одной причины не верить в это), что специальная теория относительности верна, и даваемая ей стратегия путешествия в будущее будет работать так, как и предсказывается. Технология, а не физика, держит нас привязанными к своей эпохе.^[98]

Гораздо более трудные вопросы возникают, когда мы начинаем думать о другого рода путешествиях во времени — путешествиях в прошлое. Несомненно, вы знакомы с некоторыми из них. Например, есть стандартный сценарий, в котором вы путешествуете в прошлое и предотвращаете собственное рождение. Можно обойтись и без насилия —

достаточно устроить так, чтобы ваши родители не встретились. Парадокс ясен: если вы никогда не рождались, то как же вы появились на свет и, в частности, перенеслись в прошлое и воспрепятствовали встрече своих родителей? Чтобы перенестись в прошлое и воспрепятствовать встрече своих родителей, вы должны были родиться; но если бы вы родились, перенеслись в прошлое и воспрепятствовали встрече своих родителей, то вы бы *не* родились. Мы упёрлись в логический тупик.

Сходный парадокс, предложенный философом из Оксфорда Майклом Дамметтом и подчёркнутый его коллегой Дэвидом Дойчем, дразнит ум немного другим образом, но, возможно, ещё больше сбивает с толку. Расскажу об этом парадоксе на обыденном примере. Представьте, что я создал машину времени и перенёсся на десять лет в будущее. После короткого ланча в японском ресторанчике «Тофу-для-Вас» (сеть ресторанов быстрого обслуживания, вытеснившая «Макдоналдс» после глобальной эпидемии коровьего бешенства, навсегда отбившей охоту к чизбургерам) я иду в ближайшее интернет-кафе и читаю о достижениях в теории струн за последние десять лет. И здесь меня поджидает сюрприз. Я обнаруживаю, что были решены все проблемы теории струн. Теория теперь полностью разработана и успешно используется для объяснения свойств всех известных частиц. Получено неопровержимое доказательство существования дополнительных измерений и теоретические предсказания, касающиеся суперсимметричных партнёров частиц — их массы, электрические заряды и т. д. — только что были подтверждены с помощью Большого адронного коллайдера. Больше нет никаких сомнений: теория струн является единой теорией Вселенной.

Но меня поджидает ещё больший сюрприз, когда я начинаю читать, благодаря кому достигнут столь великий прогресс. Революционная статья была написана годом ранее не кем иным, как Ритой Грин — моей матерью. Я шокирован. Не подумайте о непочтительности: моя мать — чудесная женщина, но она не учёный и не может понять, как это кто-то может быть учёным, и, к примеру, прочла лишь первые несколько страниц «Элегантной Вселенной», после чего отложила её в сторону и сказала, что из-за этой книги у неё разболелась голова. Так как же она смогла написать главную статью в теории струн? Читая её статью, я поражаюсь её простому и всё же глубочайшему прозрению и вижу в конце, что она благодарит *меня* за годы интенсивных занятий по физике и математике после её посещения семинара Тони Роббинса^[99], позволившего преодолеть ей свои внутренние страхи и пробудить в себе физика. Ну и ну, — думаю я. Она пошла на этот семинар после того, как я отправился в будущее. Лучше бы мне побыстрее

вернуться в своё время, чтобы начать с ней занятия.

Ладно, я возвращаюсь в своё время и начинаю знакомить свою мать с теорией струн. Но дело идёт туго. Проходит год, проходит второй. И хотя она старается изо всех сил, прогресса почти нет. Я начинаю беспокоиться. Мы продолжаем занятия ещё пару лет, но прогресс минимален. Теперь я по-настоящему обеспокоен. Осталось не так уж много времени до того, как должна выйти та самая революционная статья. Как же она напишет её? Наконец, я принимаю важное решение. Когда в будущем я читал эту статью, она произвела на меня такое впечатление, что прочно отпечаталась в моей памяти. Так что вместо того чтобы предоставить моей матери самой делать своё открытие — что кажется всё менее и менее вероятным — я говорю ей, что написать, а затем проверяю и убеждаюсь, что она изложила всё, что я помню. Она публикует статью, и вскоре та переворачивает весь мир физики. Появляется всё, что я запомнил из своего путешествия в будущее.

А теперь загадка. Кого благодарить за революционную статью моей матери? Конечно, не меня. Я узнал о результатах, прочтя о них в статье. Но как благодарить мою мать, если она лишь записала то, что я ей сказал? Конечно, настоящий вопрос не в том, кого благодарить — вопрос в том, откуда появилось новое знание, новое прозрение и новое понимание, представленное в статье моей матери. На кого или что можно указать и заявить: «Благодаря этому человеку или этому компьютеру появились новые результаты?» У меня, как и у моей матери, не было никаких прозрений, а никто другой не причастен к этому делу, и мы не использовали компьютер. Тем не менее, каким-то непостижимым образом эти великолепные результаты появились в статье моей матери. Видимо, в мире, позволяющем путешествовать как в прошлое, так и в будущее, знание может материализоваться из воздуха. Это, несомненно, очень странно, хотя, возможно, и не так парадоксально, как в ситуации воспрепятствования собственному рождению.

Что же нам делать с таким парадоксом и такой странностью? Следует ли нам заключить, что хотя законы физики позволяют нам путешествовать в будущее, но любая попытка перенестись в прошлое обречена на неудачу? Некоторые думают, что это несомненно так. Но, как мы сейчас увидим, существуют пути, позволяющие обходить эти коварные вопросы. Это не означает, что путешествие в прошлое возможно — это отдельная проблема, которую мы затем вкратце рассмотрим — но это показывает, что путешествие в прошлое не может исключаться теми парадоксами, которые мы только что обсуждали.

Пересмотр загадок

Вспомним, как в главе 5 мы обсуждали течение времени с точки зрения классической физики и пришли к образу, существенно отличающемуся от нашего интуитивного представления. Аккуратные рассуждения привели нас к представлению о пространстве-времени как о глыбе льда с навечно замороженными моментами времени, в отличие от известного образа времени как реки, уносящей нас от одного момента к другому. Эти замороженные моменты группируются в представление о «сейчас» — события, произошедшие одновременно, — разными наблюдателями, движущимися друг относительно друга. Мы также использовали равнозначную метафору, в которой пространство-время рассматривается как буханка хлеба, которую можно нарезать на отдельные ломтики под различными углами.

Но, безотносительно к метафорам, урок главы 5 состоит в том, что моменты — события, составляющие блок пространства-времени, — просто существуют. Они безвременные. Каждый момент — каждое событие — существует точно так же, как существует каждая точка пространства. Моменты не приходят внезапно в жизнь при освещении их «прожектором» настоящего времени наблюдателя; такой образ согласуется с нашей интуицией, но не выдерживает логического анализа. Моменты не меняются. Моменты существуют. Освещённость этим «прожектором» — просто одно из множества свойств, составляющих момент. Это прекрасно иллюстрирует рис. 5.1, дающий хотя и не реальную, но наглядную перспективу, на которой в едином взгляде охватываются все события, составляющие историю Вселенной; они все там — неподвижные и неизменные. Различные наблюдатели не согласятся в том, какие события происходят одновременно — они нарезают блок пространства-времени под разными углами, — но весь блок в целом с составляющими его событиями буквально универсален.

Квантовая механика вносит свои поправки в этот классический взгляд на время. Например, в главе 12 мы видели, что на чрезвычайно малых масштабах пространство и пространство-время неизбежно становятся волнистыми и колеблющимися. Однако (см. главу 7) концепция времени в квантовой механике зависит от решения проблемы квантового измерения. Один из подходов к этой проблеме — многомировая интерпретация — особенно уместен для решения парадоксов, возникающих в связи с путешествиями во времени, и мы рассмотрим этот подход в следующем

разделе. А пока мы останемся в рамках классической интерпретации квантовой механики и посмотрим, как с помощью представления о блоке пространства-времени можно обходить загадки, связанные с путешествием во времени.

В качестве примера рассмотрим парадокс, возникающий в том случае, если вы решите отправиться в прошлое и воспрепятствовать встрече своих родителей. Интуитивно мы представляем, как это могло бы произойти. Перед вашим путешествием в прошлое ваши родители встретились, скажем, ровно в полночь 31 декабря 1965 г. на новогодней вечеринке, а затем ваша мать родила вас. Затем, много лет спустя, вы решили переместиться в прошлое — в 31 декабря 1965 г. — и, оказавшись там, изменить события; в частности, вы намереваетесь помешать встрече ваших родителей и тем самым воспрепятствовать своему зачатию и рождению. Но давайте теперь посмотрим на это интуитивное представление с точки зрения более корректного описания времени на образе блока пространства-времени.

Сразу же видно, что по своей сути это интуитивное представление бессмысленно, поскольку в нём предполагается, что моменты могут меняться. В интуитивном представлении рисуется, что полночь 31 декабря 1965 г. «изначально» была моментом встречи ваших родителей, но ваше вмешательство «впоследствии» меняет события, так что в полночь 31 декабря 1965 г. ваших родителей разделяют целые километры, если не континенты. Проблема такой смены событий состоит в том, что моменты на самом деле не меняются; как мы видели, они просто существуют, и всё. Существует единый блок пространства-времени, постоянный и неизменный. Бессмысленно представление, что «сначала» момент был таким, а «затем» стал другим.

В вашем путешествии в 31 декабря 1965 г., когда вы якобы «оказались» там, вы всегда там и были, вы всегда там и будете, вы никогда не были не там. 31 декабря 1965 г. не наступает дважды — один раз, когда вас там нет, а второй раз — когда вы прибываете туда на машине времени. С точки зрения безвременной перспективы рис. 5.1 вы существуете — статично и неизменно — в различных точках блока пространства-времени. Если сегодня вы настраиваете свою машину времени так, чтобы она переместила вас в момент 23:50 31 декабря 1965 г., то этот момент должен быть среди всех точек пространства-времени, в которых вас можно найти. Но это значит, что ваше присутствие в канун наступающего 1966 г. является *вечной и неизменной* характеристикой блока пространства-времени.

Это ведёт к ещё более странным выводам, но снимает сам парадокс.

Например, это значит, что вы появляетесь в блоке пространства-времени ровно в 23:50 31 декабря 1965 г., но до этого момента не будет и следа вашего существования. Это странно, но не парадоксально. Если ошарашенный парень видит, как вы внезапно появляетесь «из ниоткуда» в 23:50 и с расширенными от страха глазами спрашивает, откуда вы взялись, вы можете спокойно ответить: «из будущего». В этом сценарии, по крайней мере до сих пор, нет логических противоречий. Интереснее станет тогда, когда вы попытаетесь выполнить свою миссию и удержать своих родителей от их встречи. Что же произойдёт? Что ж, повертев блок пространства-времени, мы неминуемо придём к выводу, что вы не сможете осуществить задуманное. Применение концепции изменения к моменту времени имеет не больше смысла, чем если бы вы решили подвергнуть скалу психоанализу. Ваши родители встречаются в полночь 31 декабря 1965 г., и *ничто* не может изменить это, поскольку их встреча является неизменным событием, вечно занимающим своё место в блоке пространства-времени.

Теперь, поразмыслив над этим, вы, вероятно, вспомните, что когда-то в детстве, когда вы спросили своего отца, как он сделал предложение вашей матери, он ответил, что вовсе и не собирался это делать. Он и был-то едва знаком с вашей матерью, прежде чем задал ей сокровенный вопрос. Но за десять минут до наступления Нового Года, будучи на вечеринке, он был так ошарашен внезапным появлением какого-то человека «из ниоткуда» — человека, заявившего, что пришёл из будущего, — что, повстречав вашу мать, он тут же сделал ей предложение.

Дело в том, что полный и неизменный набор событий в пространстве-времени обязательно увязывается в самосогласованное целое. Вселенная имеет смысл. Если вы отправляетесь в 31 декабря 1965 г., значит, такова ваша судьба. В блоке пространства-времени некто присутствует в 23:50 31 декабря 1965 г., но его нет там ранее. На воображаемой, внешней перспективе рис. 5.1 мы можем непосредственно увидеть это; мы также видим, что этот «некто», несомненно, — вы сами. Чтобы все эти события имели смысл, вы *должны* отправиться в 1965 г. Более того, с внешней перспективы рис. 5.1 нам видно, что ваш отец задаёт вам вопрос сразу после 23:50 31 декабря 1965 г., пугается, бежит от вас прочь и ровно в полночь встречается с вашей матерью; чуть дальше в блоке пространства-времени мы видим венчание ваших родителей, ваше рождение, затем ваше детство и, позднее, ваш вход в машину времени. Если путешествие в прошлое было бы возможным, мы не могли бы объяснять события некоторого времени только более ранними событиями; однако совокупность всех событий обязательно бы составляла непротиворечивую

связную историю.

Как уже подчёркивалось ранее, это никоим образом не означает, что путешествие в прошлое возможно. Это лишь означает, что обозначенные парадоксы, такие как воспрепятствование собственному рождению, сами полны логических изъянов. Путешествуя в прошлое, вы сможете изменить его ничуть не больше, чем значение числа π . Если вы отправляетесь в прошлое, значит, вы уже были там, вы будете там, и всегда будете составлять часть прошлого, того самого прошлого, которое привело к тому, что вы отправились в него.

С внешней перспективы рис. 5.1 это объяснение и строгое, и связанное. Обозревая совокупность событий в блоке пространства-времени, мы видим, что они сцеплены в своеобразный космический «кроссворд». Всё же, с вашей точки зрения 31 декабря 1965 г., ход событий ещё более загадочен. Выше я заявил, что даже если вы твёрдо намерены воспрепятствовать встрече своих родителей, вам никак не удастся это сделать. Вы можете наблюдать за их встречах. Вы можете даже способствовать их встрече, возможно, неумышленно, как я описал ранее. Вы можете даже несколько раз возвращаться в прошлое, каждый раз намереваясь воспрепятствовать союзу ваших родителей. Но осуществление вашего замысла означало бы изменение чего-то, по отношению к чему концепция изменения не имеет смысла.

Но даже понимая всё этого, мы не можем удержаться от вопроса: что же не даёт вам осуществить свой замысел? Если вы находитесь на новогодней вечеринке в 23:50 и видите свою мать, что мешает вам увести её? Или же, если вы видите своего молодого отца, что мешает вам — в конце концов, скажем прямо — выстрелить в него? Разве у вас нет свободы воли? Вот где, как полагают некоторые, квантовая механика может сказать своё веское слово.

Свободная воля, множество миров и путешествие во времени

Проблема свободной воли мудрёна и без усложняющего фактора путешествия во времени. Законы классической физики детерминистические. Как мы уже раньше видели, если бы вы точно знали, как всё обстоит сейчас (знали бы точное положение и скорость всех частиц во Вселенной), то законы классической физики точно сказали бы, что было или будет в любой заданный момент времени. Уравнения безразличны к предполагаемой свободе человеческой воли. На основании этого некоторые

заявляли, что свободная воля иллюзорна. Вы состоите из набора частиц, так что если бы законы классической физики могли бы сказать всё о ваших частицах в любой момент времени — где им суждено быть, как они будут двигаться и т. д., — то ваша сознательная способность определять собственные действия была бы полностью скомпрометирована. Это рассуждение убеждает меня, но с ним могут не согласиться те, кто считает, что мы представляем из себя нечто большее, чем просто набор частиц.

Как бы то ни было, это рассуждение имеет весьма ограниченное отношение к делу, поскольку наша Вселенная подчиняется квантовым, а не классическим законам. Перспектива, рисуемая квантовой физикой, физикой реального мира, имеет кое-что общее с классической перспективой, но в ней намечаются и кардинальные отличия. Из главы 7 мы почерпнули, что если нам известна квантовая волновая функция в данный момент времени для всех частиц во Вселенной, то уравнение Шрёдингера скажет, какой волновая функция была или будет в любой другой момент времени. В этом квантовая физика полностью детерминистична, как и классическая физика. Однако акт наблюдения усложняет ситуацию в квантовом мире и, как мы видели, всё ещё идут жаркие дебаты по проблеме квантового измерения. Если физики когда-либо придут к заключению, что вся квантовая механика сводится к уравнению Шрёдингера, то квантовая физика в своей целостности окажется столь же детерминистической, как и классическая. И, как и в случае с детерминизмом классической физики, одни скажут, что свободная воля — это иллюзия, а другие не согласятся с этим. Но если мы здесь упустили какую-то существенную деталь квантового мира — если переход от вероятностей к определённому результату требует нечто, находящееся за пределами стандартной квантовой концепции, — то по меньшей мере возможно, что представление о свободе воли получит конкретную реализацию в рамках физических законов. Возможно, как предполагают некоторые физики, когда-нибудь мы обнаружим, что акт сознательного наблюдения является элементом интегрального целого квантовой механики, играя роль катализатора, который выделяет один определённый результат из «квантового тумана».^[202] Лично мне это предположение кажется крайне маловероятным, но я не знаю, как его опровергнуть.

Таким образом, статус свободной воли и её роли остаётся невыясненным в рамках фундаментальных физических законов. Так что давайте рассмотрим обе возможности: когда свободная воля иллюзорна и когда она реальна.

Если свободная воля — иллюзия, и возможно путешествие в прошлое,

то ваша неспособность воспрепятствовать встрече своих родителей не составляет никакой загадки. Хотя вам кажется, что все ваши действия подконтрольны вам, но законы физики тайно водят вас за нос. Они встают у вас на пути, когда вы собираетесь увести свою мать или застрелить своего отца. Например, машина времени доставляет вас не в ту часть города, и вы прибываете на вечеринку уже после встречи своих родителей; либо вы пытаетесь нажать на спусковой курок, но механизм заклинивает; либо вы всё же нажимаете на курок, но промахиваетесь и попадаете не в своего отца, а в его соперника, и тем самым только способствуете союзу своих родителей; либо, возможно, когда вы выйдете из машины времени, у вас просто пропадёт желание воспрепятствовать встрече своих родителей. Независимо от вашего намерения в тот момент, когда вы садитесь в машину времени, ваши действия по выходу из неё составляют часть связанной истории в пространстве-времени. Законы физики пресекают любую попытку внести противоречие. Всё, что вы делаете, прекрасно вписывается в логическую историю. Логика всегда есть и всегда будет. Вы не можете изменить неизменяемое.

Если же свободная воля не является иллюзией, и возможно путешествие в прошлое, то квантовая физика рисует альтернативную картину того, что может произойти, и она совершенно отличается от того, что говорит классическая физика. В одном из особенно ошеломляющих предположений, отстаиваемом Дойчем, используется многомировая интерпретация квантовой механики. Вспомним из главы 7, что в рамках многомировой концепции любой возможный исход, запечатлённый в квантовой волновой функции, — вероятность одной частицы иметь тот или иной спин, вероятность другой частицы быть в том или ином месте — реализуется в собственной отдельной параллельной Вселенной. Вселенная, которую мы осознаём в любой заданный момент времени, является лишь одной из бесконечного числа Вселенных, в которых отдельно реализуется каждый исход, дозволяемый законами квантовой физики. В таком представлении заманчиво предположить, что ваша свобода сделать тот или иной выбор отражает возможность вступить в последующий момент в ту или иную Вселенную. Конечно, поскольку по параллельным Вселенным разбросано бесконечно много копий вас и меня, то в этом расширенном контексте потребуются толкование понятий личной идентификации и свободной воли.

Многомировая интерпретация предлагает новое разрешение потенциальных парадоксов, связанных с путешествием во времени. Прибыв на машине времени в 23:50 31 декабря 1965 г., вы вынимаете

пистолет, целитесь в своего отца, нажимаете на курок и поражаете свою цель. Но поскольку не это произошло во Вселенной, из которой вы отправились в прошлое, то ваше путешествие должно происходить не только во времени, но и *из одной параллельной Вселенной в другую*. Параллельная Вселенная, в которой вы оказались, — это та, в которой ваши родители никогда не встретились, это одна из возможных Вселенных, допускаемых многомировой интерпретацией. И тогда мы не сталкиваемся ни с каким парадоксом, поскольку существуют различные версии любого данного момента, каждая из которых находится в своей параллельной Вселенной; в многомировой интерпретации существует как бы бесконечное множество «срезов» блока пространства-времени, а не только один. Во Вселенной, из которой вы отправились в путешествие во времени, ваши родители встретились 31 декабря 1965 г., затем вы родились, выросли, затаили злобу на своего отца, стали одержимы идеей путешествия во времени и, наконец, отправились в 31 декабря 1965 г. Во Вселенной, в которую вы попали, ваш отец был застрелен 31 декабря 1965 г. до встречи с вашей матерью человеком, заявившим, что он — его сын из будущего. В этой Вселенной вы никогда не рождались, но здесь нет противоречия, поскольку вы — человек, нажавший на курок, *в действительности* имеете родителей. Просто вы со своими родителями жили в другой Вселенной. Я не могу сказать, поверит ли кто-нибудь в этой Вселенной вашим рассказам или все сочтут вас сумасшедшим. Но ясно то, что в обеих Вселенных — в той, которую вы покинули, и в той, в которую вы попали, — нет противоречивых событий.

Более того, даже в этом расширенном контексте ваше путешествие во времени не меняет прошлое. Во Вселенной, в которую вы попали, ваше присутствие в 23:50 31 декабря 1965 г. ничего не изменило: в этой Вселенной вы всегда были и всегда будете в этот момент времени. Опять же, в рамках многомировой интерпретации, каждая непротиворечивая цепочка событий развивается в одной из параллельных Вселенных. Вселенная, в которую вы попали, — это та, в которой реализуется ваш замысел убийства своего отца. Ваше присутствие 31 декабря 1965 г. и всё насилие, причинённое вами, составляют часть неизменной ткани реальности той Вселенной.

Многомировая интерпретация предлагает аналогичное решение проблемы знания, возникающего словно из ниоткуда, как в случае с моей матерью, пишущей революционную статью в области теории струн. Согласно многомировой интерпретации, в одной из мириад параллельных Вселенных моя мать *действительно* быстро стала крупным специалистом в

области теории струн, и в её статье я прочёл о её собственных открытиях. Отправившись в будущее, я попал в *ту* Вселенную. Результаты, о которых я узнал из статьи, были действительно открыты моей матерью, но матерью, живущей в той Вселенной. Затем, вернувшись в своё время, я оказался в другой Вселенной — той, в которой моя мать с большим трудом осваивает физику. После ряда лет, прошедших в попытках обучить её физике, я сдаюсь и в конце концов сообщаю ей, что написать в статье. Но при таком развитии событий нет загадки относительно того, кто же совершил революционный прорыв. Его совершила моя мать, живущая в той Вселенной, в которой она — ас в физике. В результате моих путешествий во времени произошло лишь то, что её открытия передались из одной Вселенной в другую. Если вы готовы скорее допустить существование параллельных Вселенных, чем открытий, не имеющих авторов, то вот вам менее загадочное объяснение связи знания с путешествием во времени.

Ни одно из предположений, обсуждавшихся в этом и предыдущих разделах, не является обязательно разрешением загадок и парадоксов путешествия во времени. Эти предположения нацелены лишь на то, чтобы показать, что эти загадки и парадоксы не исключают возможности путешествия в прошлое, поскольку на нашем современном уровне понимания физика позволяет маневрировать вокруг этих проблем. Но если какой-то вариант не исключается, то это совсем не означает, что он действительно возможен. Так что давайте теперь поставим главный вопрос.

Возможно ли путешествие в прошлое?

Самые рассудительные физики ответили бы, что нет. Я тоже сказал бы «нет». Но это только отчасти «нет», в отличие от определённого «нет», которое вы получили бы, спросив, позволяет ли специальная теория относительности разгоняться массивным телам до скорости света, а затем превосходить её, или допускает ли теория Максвелла расщепление частицы с единичным электрическим зарядом на частицы с двумя единицами заряда.

В действительности никто не показал, что законы физики совершенно исключают возможность путешествия в прошлое. Напротив, некоторые физики даже разработали гипотетические инструкции, как цивилизации с неограниченными технологическими возможностями построить машину времени, действуя полностью в рамках известных законов физики (говоря о машине времени, мы всегда будем иметь в виду аппарат, позволяющий

путешествовать как в будущее, так и в прошлое). Их предложения ничуть не напоминают вращающиеся махины, описанные Гербертом Уэллсом, или автомобиль «ДеЛориан», модифицированный доктором Брауном в фильме «Назад в будущее». Но их конструктивные элементы находятся столь близко от пределов возможного, допускаемых известной физикой, что многие исследователи подозревают: с последующими уточнениями в понимании законов природы существующие и будущие проекты машин времени преодолеют границы физически возможного. Но на сегодняшний день это подозрение основывается на инстинктивном ощущении и косвенных уликах, а не на твёрдом доказательстве.

Сам Эйнштейн во время десятилетних исследований, которые привели к созданию общей теории относительности, раздумывал над вопросом путешествия в прошлое.^[203] Откровенно говоря, было бы странно, если бы он не задавался этим вопросом. По мере того как его радикальный пересмотр концепций пространства и времени сбрасывал привычные догмы, всё более насущным становился вопрос, как далеко зайдёт этот переворот. Какие свойства привычного нам интуитивно воспринимаемого времени сохранятся (если вообще какие-то сохранятся)? Эйнштейн никогда особенно не распространялся по вопросу путешествия во времени, поскольку, по его собственному мнению, он не достиг в нём большого прогресса. Но в последующие десятилетия после публикации общей теории относительности медленно, но верно, наметился прогресс в исследованиях других физиков.

Одними из первых работ по общей теории относительности, имеющими отношение к машинам времени, явились статьи, написанные в 1937 г. шотландским физиком В. Дж. ван Стокумом^[204] и в 1949 г. Куртом Гёделем, коллегой Эйнштейна по Институту перспективных исследований. Ван Стокум в рамках общей теории относительности изучал задачу о вращении очень плотного и бесконечно длинного цилиндра вокруг своей оси. Хотя бесконечный цилиндр физически нереален, анализ ван Стокума привёл к интересным выводам. Как мы видели в главе 14, массивные вращающиеся объекты увлекают за собой пространство в кружащийся водоворот. В случае бесконечного цилиндра это увлечение столь значительное, что математический анализ показывает: не только пространство, но и время захватывается этим водоворотом. Грубо говоря, вращение настолько скручивает течение времени, что круговое движение вокруг цилиндра доставляет вас в прошлое. Облетев на ракете вокруг цилиндра, вы можете вернуться в стартовую точку в момент времени,

предшествующий вашему старту. Конечно, невозможно создать бесконечно длинный вращающийся цилиндр, но эта работа явилась первым намёком на то, что общая теория относительности может и не запрещать путешествие в прошлое.

В работе Гёделя тоже рассматривалась ситуация, связанная с вращательным движением. Но вместо того чтобы рассматривать объект, вращающийся в пространстве, Гёдель задался вопросом: что происходит, если само пространство претерпевает вращательное движение? Мах сказал бы, что такая постановка вопроса не имеет смысла. Если вращается вся Вселенная в целом, то нет ничего, по отношению к чему она бы вращалась. Мах заключил бы, что вращающаяся Вселенная и стационарная Вселенная — это одно и то же. Но это разногласие с Махом — просто ещё один пример того, в чём общая теория относительности не полностью соответствует реляционной концепции пространства. Согласно общей теории относительности имеет смысл говорить о вращении всей Вселенной в целом, причём это вращение имеет наблюдаемые последствия. Например, общая теория относительности показывает, что во вращающейся Вселенной лазерный луч будет описывать спираль, а не прямую линию (напоминая траекторию движения медленно летящей пули, выпущенной из игрушечного пистолета, какой бы вы её увидели, если бы выстрелили, крутясь на карусели). Самым удивительным в исследовании Гёделя было то, что он показал: если во вращающейся Вселенной пустить ракету по специальной подходящей траектории, то ракета вернётся в точку своего старта в момент времени, *предшествующий* старту. Тем самым сама вращающаяся Вселенная оборачивается машиной времени.

Эйнштейн поздравил Гёделя с его открытием, но предположил, что в дальнейших исследованиях может обнаружиться, что решения общей теории относительности, допускающие путешествие в прошлое, конфликтуют с другими существенными физическими требованиями, делая эти решения не более чем математическим курьёзом. Что касается этого решения Гёделя, то всё более точные наблюдения всё больше убеждают, что наша Вселенная не вращается, оставляя всё меньше шансов на причастность модели Гёделя к нашему миру. Но ван Стокум и Гёдель выпустили джинна из бутылки; за пару десятилетий было найдено ещё несколько решений уравнений Эйнштейна, допускающих путешествие в прошлое.

В последние десятилетия интерес к гипотетическим конструкциям машины времени вновь ожил. В 1970-х гг. Фрэнк Типлер заново проанализировал и уточнил решение ван Стокума, а в 1991 г. Ричард Готт

из Принстонского университета открыл другой метод построения машины времени с использованием так называемых космических струн (гипотетических бесконечно длинных нитеобразных остатков фазовых переходов в ранней Вселенной). Всё это важные достижения, но проще всего описать конструкцию, предложенную Кипом Торном и его студентами из Калифорнийского технологического института. Они использовали представление о так называемых «кротовых норах» во Вселенной.

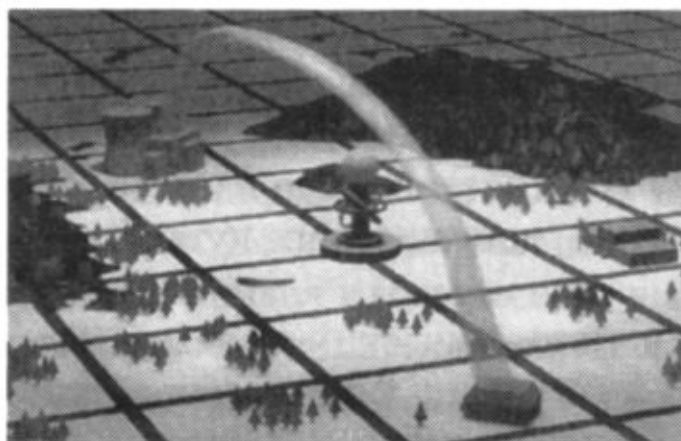
Проект машины времени на основе кротовой норы

Я сначала изложу основы стратегии построения машины времени, предложенной Торном, а в следующем разделе мы обсудим проблемы, с которыми столкнётся любой строитель машины времени, руководствующийся этим планом.

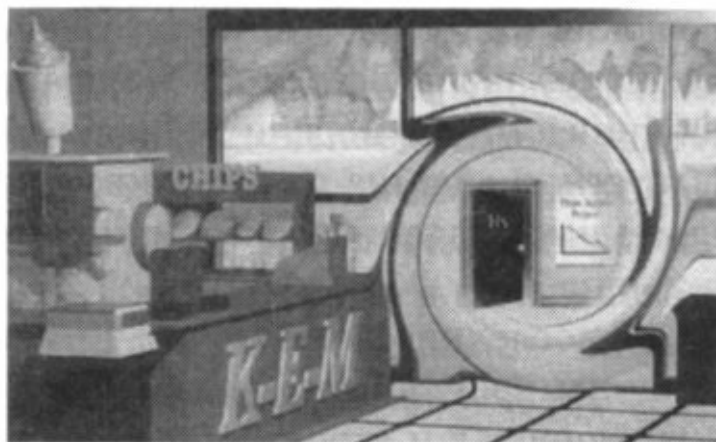
«Кротовая нора» — это гипотетический тоннель в пространстве. Более привычный нам тоннель, такой как тоннель в горе, позволяет сократить путь из одного места в другое. Кротовые норы служат нам аналогичным образом, но они отличаются от привычных нам тоннелей в одном важном отношении. В то время как обычные туннели дают новый путь в существующем пространстве (гора и занимаемое ей пространство существуют до строительства тоннеля), кротовая нора предоставляет тоннель из одного места пространства в другое по новой, ранее не существовавшей трубе пространства. Устрани вы тоннель через гору, занимаемое горой пространство всё равно останется. А вот если вы устранили кротовую нору, то исчезнет и занимаемое ей пространство.

На рис. 15.2а иллюстрируется кротовая нора, соединяющая супермаркет «На скорую руку» с атомной электростанцией Спрингфилда, но эта схема может вводить в заблуждение, поскольку может показаться, что кротовая нора простирается по воздушному пространству Спрингфилда. Более точным является представление о кротовой норе как о новой области пространства, соединяющейся с обычным, известным нам пространством только на своих концах — «входах». Если, бродя по улицам Спрингфилда, вы осматриваете небо в поисках кротовой норы, вы ничего не увидите. Единственный способ увидеть её — это пойти в супермаркет «На скорую руку», где вы обнаружите отверстие в обычном пространстве — вход в кротовую нору. Глядя сквозь это отверстие, вы увидите атомную электростанцию в месте расположения другого входа, как на рис. 15.2б.

Другой недостаток рис. 15.2а состоит в том, что кротовая нора не выглядит кратчайшим путём. Можно исправить это, изобразив кротовую нору как на рис. 15.3. Как видно, обычный маршрут от атомной электростанции до супермаркета действительно длиннее, чем новый путь через кротовую нору. Искривления на рис. 15.3 отражают трудности передачи на плоской странице геометрии общей теории относительности, но сам рисунок даёт интуитивное представление о новом соединении через кротовую нору.



а)



б)

Рис. 15.2. (а) Кротовая нора, соединяющая супермаркет «На скорую руку» с атомной электростанцией. (б) Вид через кротовую нору со стороны супермаркета на атомную станцию

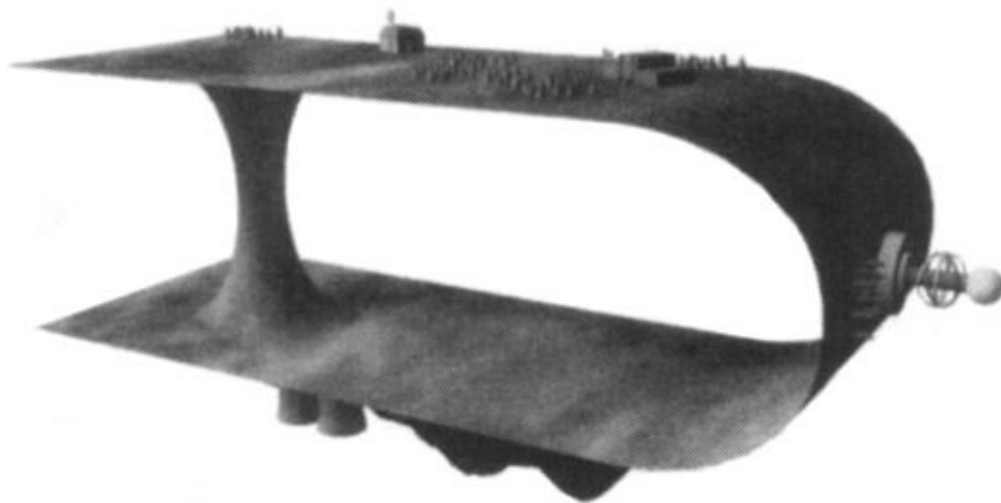


Рис. 15.3. На этом рисунке наглядно видно, что кротовая нора предоставляет более короткий путь (кротовая нора на самом деле находится внутри супермаркета «На скорую руку» и внутри атомной электростанции, но это труднее показать на таком рисунке)

Никто не знает, существуют ли в действительности кротовые норы, но несколько десятилетий тому назад физики установили, что их существование допускается уравнениями общей теории относительности, так что они вполне могут быть объектами теоретического исследования. В 1950-х гг. Джон Уиллер вместе со своими сотрудниками одними из первых исследовали кротовые норы и открыли множество их фундаментальных математических свойств. Позже Торн с сотрудниками вскрыли всё богатство кротовых нор, осознав, что они могут давать короткие пути не только в пространстве, но и во времени.

Идея состоит вот в чём. Представим, что Барт и Лиза стоят на противоположных концах кротовой норы Спрингфилда — Барт на атомной электростанции, а Лиза в супермаркете «На скорую руку», — непринуждённо болтая друг с другом о том, что подарить Гомеру на его день рожденья, и затем Барт решает совершить короткое трансгалактическое путешествие (чтобы достать Гомеру его любимые рыбные палочки, изготавливаемые в галактике Андромеды). Лизе не очень-то нравится эта затея, но поскольку она всегда хотела посмотреть на галактику Андромеды, она уговаривает Барта погрузить на его корабль его вход кротовой норы, так чтобы затем она смогла взглянуть через кротовую нору на далёкую галактику. Возможно, вы думаете, что во время своего

путешествия Барт растянет кротовую нору, но такая мысль предполагает, что кротовая нора соединяет супермаркет с космическим кораблём через обычное пространство. Но это не так. И, как проиллюстрировано на рис. 15.4, благодаря чудесам геометрии общей теории относительности протяжённость кротовой норы может оставаться неизменной в ходе всего путешествия. Это самое главное. Даже если Барт находится в галактике Андромеды, расстояние между ним и Лизой по кротовой норе не меняется. Таково свойство кротовой норы как короткого пути сквозь пространство.

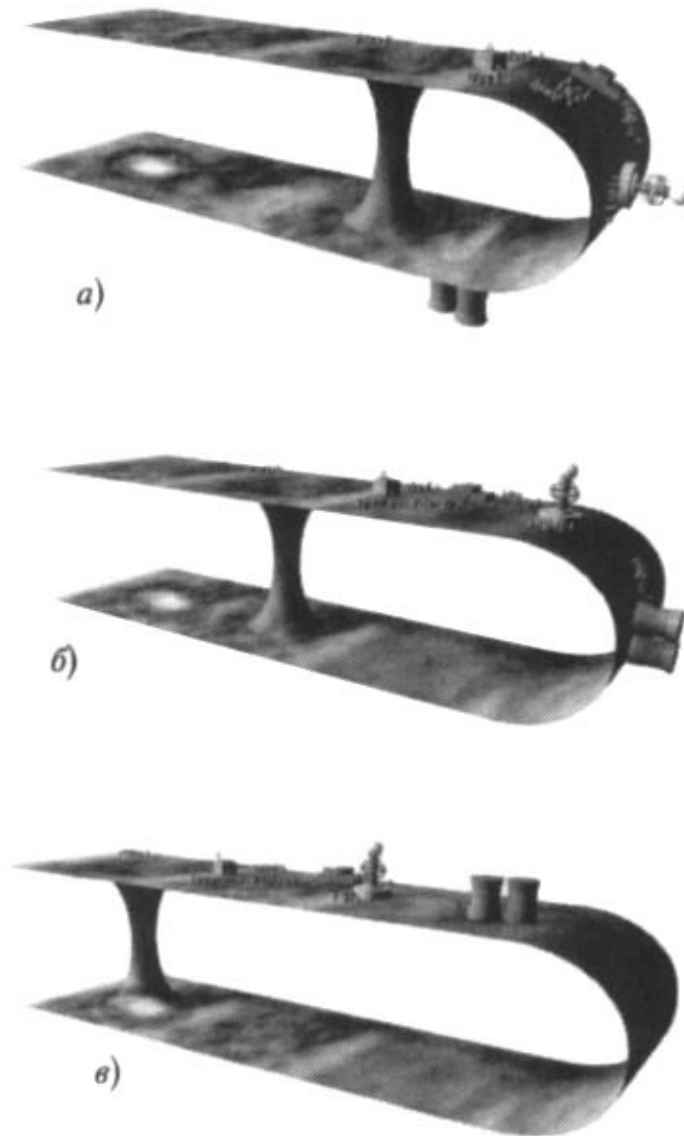


Рис. 15.4. (а) Кротовая нора, соединяющая супермаркет «На скорую руку» с атомной электростанцией. (б) Нижний вход кротовой норы перенесён (с атомной электростанции) в

космическое пространство (на космическом корабле, не показанном на этом рисунке). Протяжённость кротовой норы остаётся неизменной. (в) Вход кротовой норы достигает галактики Андромеды; другой её вход всё ещё находится в супермаркете. Протяжённость кротовой норы не меняется в ходе всего путешествия

Для определённости предположим, что Барт развивает скорость, составляющую 99,999999999999999999% от скорости света, и на путешествие до галактики Андромеды у него уходит четыре часа. Во время путешествия Барт продолжает болтать с Лизой как и раньше, через кротовую нору. Когда корабль достигает галактики Андромеды, Лиза просит Барта замолчать, чтобы спокойно насладиться разворачивающейся панорамой далёкой галактики. Но Барту не терпится поскорее взять рыбные палочки и вернуться домой. Лиза возмущена эгоизмом Барта, но соглашается поддерживать с ним связь до его возвращения. Четыре часа спустя корабль Барта благополучно садится на лужайке перед школой Спрингфилда.

Выглянув в иллюминатор своего корабля, Барт несколько шокирован. Здание школы выглядит совсем по-другому, а табло над футбольным стадионом показывает дату 6 млн лет спустя после его отлёта. «Что за чёрт?!» — говорит он самому себе, но мгновение спустя всё становится ясно. Из недавней душевной беседы с Шестёркой Бобом^[100] он вспоминает, что специальная теория относительности утверждает, что чем быстрее вы двигаетесь, тем медленнее идут ваши часы. Если вы на высокой скорости понесётесь в открытый космос, а затем вернётесь, то по вашим часам может пройти всего лишь несколько часов, тогда как по часам неподвижного наблюдателя пройдут тысячи или миллионы лет, если не больше. Быстро подсчитав, Барт убеждается, что за восемь часов его путешествия на корабле на Земле прошло 6 млн лет. Дата на табло верная; Барт понимает, что перенёсся далеко в будущее Земли.

«...Барт, отзовись! Барт! — кричит Лиза через кротовую нору. — Ты слышишь меня? Иди сюда. Я хочу успеть вернуться домой к обеду». Барт смотрит в жерло кротовой норы и говорит Лизе, что уже приземлился на лужайке возле школы. Вглядываясь через кротовую нору, Лиза видит, что Барт говорит правду, но, бросая взгляд из супермаркета на школу, она не видит его корабля на лужайке. «Я не вижу твоего корабля», — говорит она.

«На самом деле нет ничего странного, — с гордостью отвечает Барт. — Я приземлился возле школы, но в будущем, через 6 млн лет. Ты не можешь

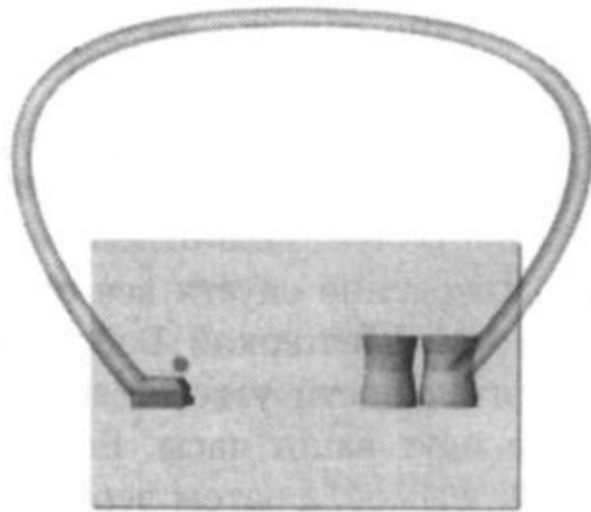
увидеть меня, выглянув в окно супермаркета, ведь хотя ты смотришь туда, куда надо, но не в то время. Ты смотришь на 6 млн лет раньше».

«О, верно, это всё проделки специальной теории относительности, — соглашается Лиза. — Круто. Но, как бы там ни было, я хочу успеть домой к обеду, так что пролезай через кротовую нору, нам надо поторопиться». «Ладно», — уступает Барт, пролезая через кротовую нору. Затем он покупает в супермаркете «Твикс» и идёт домой вместе с Лизой.

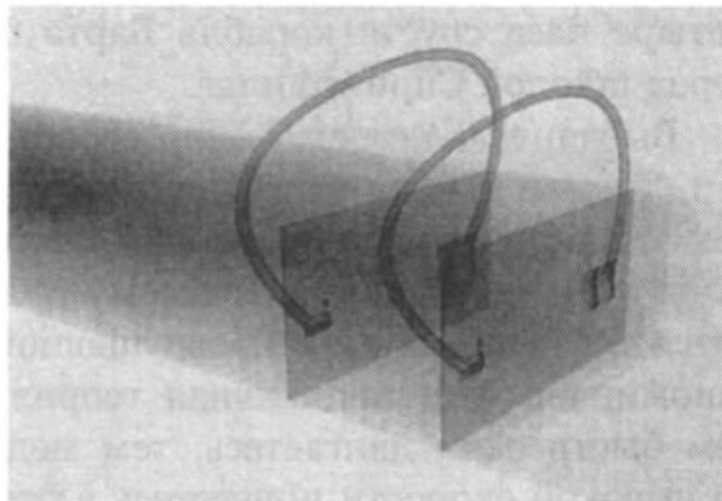
Заметьте, что хотя Барт прошёл через кротовую нору всего за мгновение, *она перенесла его на 6 млн лет назад*. Он приземлился на космическом корабле с входом в кротовую нору далеко в будущем. Если бы он вышел в город, поговорил бы с людьми, почитал бы газеты, то всё подтвердило бы этот факт. И всё же, пройдя через кротовую нору и встретившись с Лизой, он вернулся в своё настоящее время. То же самое верно по отношению к любому, кто мог бы последовать за Бартом сквозь кротовую нору: он перенёсся бы во времени на 6 млн лет назад. Аналогично, любой, кто пролез бы через кротовую нору со стороны супермаркета, очутился бы в будущем, 6 млн лет спустя. Важно то, что Барт не просто повозил по пространству вход в кротовую нору. Его путешествие перенесло этот вход и во времени. *Путешествие Барта перенесло его и вход в кротовую нору в будущее Земли. Короче говоря, Барт превратил туннель в пространстве в туннель во времени; он превратил кротовую нору в машину времени.*

Грубый взгляд на произошедшее даёт рис. 15.5. На рис. 15.5а мы видим, как кротовая нора соединяет одну точку пространства с другой (кротовая нора схематически изображена так, чтобы подчеркнуть то обстоятельство, что она находится вне обычного пространства). На рис. 15.5б мы видим эволюцию этой кротовой норы во времени при условии, что оба её конца остаются неподвижными. («Срезы» по времени делает неподвижный наблюдатель.) Из рис. 15.5в мы видим, что происходит, когда один из концов грузится на космический корабль и отправляется в далёкое путешествие с последующим возвращением в исходную точку. Течение времени для движущегося конца замедляется, так что он переносится в будущее. (Если по движущимся часам прошёл всего лишь час, то по неподвижным часам могли пройти тысячи лет; по возвращении космического корабля часы оказываются снова рядом друг с другом, так что движущиеся часы перенеслись в будущее, отмеряемое по стационарным часам.) Таким образом, оказывается, что концы одной кротовой норы связывают уже два разных среза по времени, один из которых находится в *будущем*, как показано на рис. 15.5в. Разница во

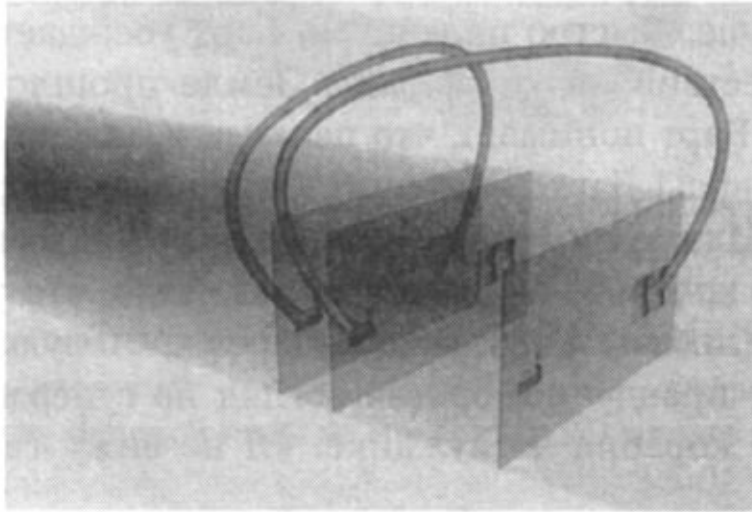
времени между концами норы так и остаётся (если, конечно, их больше не двигать). В любой момент, войдя в один конец кротовой норы и выйдя из другого, вы становитесь путешественником во времени.



a)



b)



в)

Рис. 15.5. (а) Кротовая нора, созданная в некоторый момент времени, соединяет две области пространства. (б) Если концы кротовой норы не движутся относительно друг друга, то они «проходят» сквозь время одинаково, так что туннель соединяет области пространства в один и тот же момент времени. (в) Если один из концов кротовой норы отправить на высокой скорости в космическое пространство, а затем вернуть на место (этот процесс не показан на рисунке), то для путешествовавшего конца пройдёт меньше времени и, следовательно, туннель теперь будет соединять области пространства в разные моменты времени. Кротовая нора стала машиной времени

Построение машины времени на кротовой норе

Теперь ясен план построения машины времени. Шаг 1. Найти или создать кротовую нору, достаточно широкую для вас и всех, кого вы хотите посылать сквозь время. Шаг 2. Создать разницу во времени между её концами — например, двигая один конец относительно другого. Вот и всё. В принципе.

А как на практике? Что же, как я заметил в самом начале, неизвестно, существуют ли в действительности кротовые норы. Некоторые физики предположили, что крохотные кротовые норы могут в избытке существовать на микроскопическом уровне ткани пространства, где они постоянно вызываются квантовыми флуктуациями гравитационного поля.

Если это так, то задача будет состоять в том, чтобы увеличить одну из них до макроскопического размера. Выдвигались предложения, как этого можно было бы достичь, но все они вряд ли выходят за пределы чисто теоретических полётов фантазии. Другие физики представляют себе создание больших кротовых нор в качестве инженерного проекта прикладной общей теории относительности. Мы знаем, что пространство откликается на распределение материи и энергии таким образом, что, обладая достаточным контролем над материей и энергией, мы могли бы в некоторой области пространства породить кротовую нору. В этом подходе возникает дополнительное усложнение, ведь подобно тому как нам надо разорвать склон горы, чтобы проделать в ней туннель, точно также нам требуется разорвать ткань пространства, чтобы прикрепить к ней вход в кротовую нору.^[205] Неизвестно, допускаются ли законами физики такие разрывы пространства. Работа, которую я вёл в рамках теории струн (см. главу 13), показала, что возможны определённые виды пространственных разрывов, но пока неизвестно, имеют ли эти разрывы какое-либо отношение к порождению кротовых нор. Вывод состоит в том, что умышленное порождение макроскопических кротовых нор является фантазией, которая, в лучшем случае, находится *очень* далеко от своей реализации.

Более того, даже если бы нам удалось как-то заполучить кротовую нору, то проблемы на этом не кончились бы; мы столкнулись бы с парой существенных препятствий. Во-первых, ещё в 1960-х гг. Уиллер и Роберт Фуллер с помощью уравнений общей теории относительности показали, что кротовые норы нестабильны. Их стены стремятся схлопнуться внутрь за доли секунды, что делает их непригодными для какого-либо путешествия. Однако недавно физики (включая Торна и Морриса, а также Мэтта Виссера) нашли возможный выход из положения. Если кротовая нора не пуста и содержит вещество — так называемую *экзотическую материю*, — которое может давить на её стены изнутри, то, возможно, удастся не допустить схлопывания кротовой норы. По своему расталкивающему воздействию экзотическая материя аналогична космологической постоянной, но благодаря отрицательной энергии, а не отрицательному давлению, характеризующему эту постоянную.^[206] Квантовая механика допускает существование отрицательной энергии при очень специфических условиях,^[207] но немыслимо сгенерировать столько экзотической энергии, чтобы её хватило на поддержание кротовой норы в открытом состоянии. (Например, Виссер подсчитал, что для поддержки

кротовой норы шириной в метр требуется по порядку величины приблизительно столько же отрицательной энергии, сколько (положительной) энергии вырабатывает Солнце за 10 млрд лет.)^{208}

Во-вторых, даже если кто-то найдёт или создаст макроскопическую кротовую нору, и даже если мы как-нибудь умудримся удержать её стены от мгновенного коллапса, и даже если мы сможем внести разницу во времени между концами кротовой норы (скажем, отправив один конец в космос на высокой скорости, а затем вернув его на место), но останется ещё одна преграда к обретению машины времени. Ряд физиков, включая Стивена Хокинга, указали на возможность того, что вакуумные флуктуации — колебания, которым подвержены все поля, даже в пустом пространстве (они возникают из-за квантовой неопределённости, о чём мы говорили в главе 12), — могут разрушить кротовую нору, как только она будет готова стать машиной времени. Дело в том, что в этот момент может вступить в игру разрушительный механизм обратной связи (подобный тому, что приводит к пронзительному гудению, когда микрофон и громкоговоритель не настроены должным образом). Вакуумные флуктуации из будущего могут пройти в прошлое через кротовую нору, откуда они могут перейти в будущее через обычное пространство и время, затем снова войти в нору и снова оказаться в прошлом, порождая тем самым бесконечный цикл и наполняя кротовую нору всё большей энергией. Такая интенсивная накачка энергией, по-видимому, разрушит кротовую нору. Теоретические исследования говорят, что это реальная возможность, но проведение необходимых расчётов наталкивается на известные трудности, связанные с одновременным применением общей теории относительности и квантовой механики в искривлённом пространстве, так что этому нет убедительного доказательства.

Неимоверные трудности, связанные с созданием кротовых нор, очевидны. Но окончательное слово не будет сказано до тех пор, пока не улучшится наше знание в области соприкосновения квантовой механики и гравитации, что, возможно, придёт с достижениями теории суперструн. Хотя на интуитивном уровне физики обычно соглашались с тем, что путешествие в прошлое невозможно, но на сегодняшний день этот вопрос ещё не окончательно закрыт.

Толпы зевак из будущего

Раздумывая над путешествиями во времени, Хокинг поднял

интересный вопрос. Если путешествие во времени возможно, то почему, — спрашивает он, — нас не наводняют гости из будущего? Что же, возможно и наводняют, — можно было бы ответить. И можно было бы пойти дальше и заявить, что мы уже упекли в психбольницу стольких из них, что они уже и не решаются о себе заявлять. Конечно, Хокинг наполовину шутит (и я тоже), но он ставит серьёзный вопрос. Если вы, как и я, думаете, что нас ещё не посещали гости из будущего, то не значит ли это, что путешествие во времени невозможно? Конечно, если людям в будущем удалось бы построить машину времени, то некоторые историки непременно получили бы грант на тщательное изучение событий, связанных с созданием первой атомной бомбы или с первым полётом на Луну. Так что если мы верим, что никто не посещал нас из будущего, то, возможно, мы подразумеваем, что машина времени никогда не будет построена.

Однако это слишком поспешный вывод. *Машины времени, предложенные до сих пор, не позволяют путешествовать в прошлое, предшествующее созданию самой первой машины времени.* Для машины времени на кротовой норе это легко понять, взглянув на рис. 15.5. Хотя есть разница во времени между концами кротовой норы, и хотя эта разница позволяет путешествовать вперёд-назад во времени, но невозможно перенестись во время, предшествовавшее моменту создания разницы во времени. Сама кротовая нора не существует на дальнем левом конце «буханки» пространства-времени, так что невозможно использовать кротовую нору, чтобы добраться туда. Значит, если первая машина времени будет построена, скажем, через 10 000 лет, то, несомненно, *именно тот* момент привлечёт толпы зевак из будущего, но все предшествовавшие времена, включая наше, будут оставаться для них недоступными.

Лично мне кажется любопытным и вызывающим то обстоятельство, что наше современное понимание законов природы не только говорит о том, как можно избегать кажущихся парадоксов, связанных с путешествием во времени, но и предлагает способы реализации путешествия во времени. Не поймите меня неправильно: я отношу себя к числу рассудительных физиков, интуитивно чувствующих, что когда-нибудь мы полностью исключим возможность путешествия в прошлое. Но пока нет окончательного доказательства, я считаю оправданным не исключать такую возможность. Исследователи, сосредоточенные на этой проблеме, по крайней мере существенно углубляют наше понимание пространства и времени в экстремальных ситуациях. А в лучшем случае они предпринимают первые шаги, которые приведут нас к приобщению к пространственно-временной супермагистральной. В конце концов, время до

создания первой машины времени навечно останется за пределами нашей достижимости и достижимости наших потомков.

Глава 16. Будущее одной иллюзии

Перспективы пространства и времени

Большую часть своей жизни физики проводят в состоянии смятения и непонимания. Это «профессиональные риски» их работы. Преуспеть в физике значит охватить неопределённость, шагая извилистой дорогой к ясности. Дразнящий аромат препятствий — вот что вдохновляет внешне обычных людей на необычные подвиги находчивости и творчества; ничто так не концентрирует разум, как диссонирующие элементы, ожидающие гармонического решения. Но на пути к объяснению — в поисках новых парадигм для ответов на глубочайшие вопросы — теоретики должны упорно пробираться через джунгли путаницы, будучи ведомыми, главным образом, предчувствиями, намёками, ощущениями и прикидками. И поскольку большинство исследователей склонны скрывать свои следы, то открытия зачастую мало говорят о трудностях пройденного пути. Так что всегда имейте в виду, что ничто не даётся легко. Природа не так-то просто раскрывает свои секреты.

В данной книге мы взглянули на многочисленные главы в истории попыток понять пространство и время. И хотя мы познакомились с некоторыми глубокими и поразительными прозрениями, ещё не наступил момент «эврики», когда исчезает вся путаница и появляется полная ясность. Мы, совершенно точно, ещё блуждаем в джунглях. Так куда же идти? Какова очередная глава в истории пространства-времени? Конечно, никто не знает этого наверняка. Но в последние годы появился ряд идей, и хотя их ещё предстоит увязать в согласованную картину, многие физики верят, что они указывают на следующий большой переворот в нашем понимании космоса. Известные нам сейчас пространство и время могут обернуться всего лишь указанием на существование более тонких, более глубоких и более фундаментальных принципов, лежащих в основе физической реальности. В последней главе мы рассмотрим некоторые из этих намёков и попытаемся уловить проблески того, куда они могут нас вести в продолжающемся поиске понимания ткани космоса.

Фундаментальны ли понятия пространства и времени?

Немецкий философ Иммануил Кант считал, что при описании

Вселенной будет не просто трудно, а решительно невозможно покончить с пространством и временем. И мне понятно, откуда исходит это утверждение. Всякий раз, когда я сижу, закрыв глаза, и пытаюсь размышлять о вещах, я оказываюсь не в состоянии представлять их не занимающими какую-либо область пространства или существующими вне времени. Совершенно не в состоянии. Пространство или время всегда умудряется просачиваться: первое — через контекст, второе — через изменение. По иронии, ближе всего я подхожу к освобождению своего мышления от прямой ассоциации с пространством-временем, когда я погружён в математические расчёты (часто имеющие отношение к пространству-времени!), поскольку мои мысли кажутся поглощёнными, хотя бы на мгновение, абстрактной субстанцией кажущейся лишённой пространства и времени. Но всё же само мышление и тело, в котором оно имеет место, остаются частью известного нам пространства-времени. Проще убежать от собственной тени, чем по-настоящему отделаться от пространства и времени.

Тем не менее многие современные ведущие физики подозревают, что пространство и время, несмотря на свою вездесущность, не являются поистине фундаментальными понятиями. Подобно тому как твёрдость пушечного ядра вытекает из коллективных свойств составляющих его атомов, и подобно тому как аромат розы определяется коллективными свойствами её молекул, а стремительность ягуара обусловлена коллективными свойствами его мускулов, нервов и тканей, точно также и свойства пространства и времени могут вытекать из коллективного поведения неких иных, более фундаментальных составляющих, которые ещё предстоит установить.

Суммируя такие рассуждения, физики иногда говорят, что пространство-время может быть иллюзией — провоцирующей картинкой, требующей дальнейших пояснений. В конце концов, если на вас летит пушечное ядро, или вы вдохнули чарующий аромат розы, или заметили стремительно мчащегося ягуара, то вы не будете отрицать их существование просто из-за того, что они состоят из более тонких и более фундаментальных элементов. Напротив, большинство людей согласятся, что эти материальные объекты действительно существуют и, более того, что много чего ещё можно узнать, изучив, как их хорошо известные характеристики следуют из атомных составляющих. Но поскольку эти объекты составные, то не стоит пытаться строить теорию Вселенной на базе пушечных ядер, роз или ягуаров. Аналогичным образом, если пространство и время окажутся составными сущностями, то это не будет

означать, что иллюзорны их хорошо известные проявления, такие как ведро Ньютона или гравитация Эйнштейна; несомненно, по мере улучшения нашего понимания пространство и время не утратят своих глобальных позиций в эмпирической реальности. Составной характер пространства-времени будет лишь означать, что предстоит открыть ещё более глубокое описание Вселенной, не опирающееся на категории пространства и времени. Значит, иллюзией окажется наше собственное творение: ошибочная вера в то, что глубочайшее понимание космоса поместит в фокус пространство-время. Подобно тому как твёрдость пушечного ядра, аромат розы и стремительность ягуара исчезают при изучении материи на атомном и субатомном уровнях, точно так же и пространство и время могут исчезнуть в самой фундаментальной формулировке законов природы.

Предположение о нефундаментальном характере пространства-времени может показаться вам чем-то надуманным. И вы вполне можете оказаться правы. Но молва о предстоящем исключении пространства-времени из числа глубочайших физических понятий рождена не безответственным теоретизированием. Напротив, это предположение хорошо подкрепляется рядом аргументированных соображений. Давайте взглянем на самые обещающие.

Квантовое усреднение

В главе 12 мы говорили, что ткань пространства, как и всё остальное в нашей квантовой Вселенной, подвержена квантовым флуктуациям. Именно эти флуктуации мешают построить осмысленную квантовую теорию гравитации на базе представлений о точечных частицах. Заменяя точечные частицы на петли и отрезки, теория струн умиряет флуктуации, существенно снижая их амплитуду, и благодаря этому удаётся объединить квантовую механику и общую теорию относительности. Тем не менее флуктуации пространства-времени всё же существуют (что иллюстрирует рис. 12.2), и благодаря им мы можем найти важные путеводные нити, касающиеся участи пространства-времени.

Прежде всего, известные пространство и время, наполняющие наши мысли и входящие в наши уравнения, появляются в результате некоего усреднения. Что вы увидите на телевизионном экране, приблизившись к нему на расстояние в несколько сантиметров? Увиденное будет сильно отличаться от того, что вы видите с более комфортного расстояния, когда ваши глаза уже не различают отдельные точки экрана и перед вашим

взором предстаёт усреднённая гладкая картинка. Заметьте, что лишь благодаря усреднению отдельных точек возникает сплошное изображение. Аналогично, микроскопическая структура пространства-времени пронизана случайными флуктуациями, но мы непосредственно не осознаём это, поскольку не способны разрешить пространство-время на таких крохотных масштабах. Вместо этого наши глаза и даже самое мощное наше оборудование объединяет отдельные флуктуации в некое среднее подобно объединению отдельных точек в целостную картину на телевизионном экране. Поскольку флуктуации случайны, то в малой области отдельные флуктуации обычно усредняются и гасят друг друга, так что в среднем получается гладкое пространство-время. Как и в аналогии с телевизионным изображением, *гладкая форма пространства-времени получается лишь за счёт усреднения.*

Благодаря квантовому усреднению мы получаем осязаемую интерпретацию утверждения, что известное нам пространство-время может быть иллюзией. Средние величины полезны для многих целей, но по своей природе они не могут дать точную детальную картину. По статистике средняя семья в США имеет 2,2 ребёнка, но на вас посмотрят как на сумасшедшего, если вы попросите показать такую семью. Согласно той же статистике литр молока в США стоит в среднем 0,735 доллара, но вы вряд ли найдёте магазин, торгующий молоком точно по этой цене. Точно так же известное нам пространство-время, получающееся в результате усреднения, в принципе не может описать детали того, что мы хотим назвать фундаментальными компонентами. Пространство и время могут быть всего лишь приближёнными, собирательными концепциями, чрезвычайно полезными при анализе Вселенной на всех масштабах, кроме ультрамикроскопических, но всё же иллюзорными, как и семья, имеющая 2,2 детей.

Второе соображение состоит в том, что из-за неограниченного роста квантовых флуктуаций по мере уменьшения пространственно-временных масштабов представление о делимости пространства и времени перестаёт быть справедливым при достижении планковской длины (10^{-33} см) и планковского времени (10^{-43} с). Мы сталкивались с этим соображением в главе 12, подчеркнув при этом, что хотя оно и совсем не согласуется с нашими обычными представлениями о пространстве и времени, но нет ничего удивительного в том, что свойство, почерпнутое из обычного повседневного опыта, оказывается неверным в микромире. И поскольку сколь угодно малая делимость пространства и времени является одним из

их свойств, самых характерных для повседневного опыта, то неприменимость этого представления на ультракоротких масштабах даёт другой намёк на нечто, скрывающееся в глубинах микромира, — нечто, что можно было бы назвать основополагающим субстратом пространства-времени. Мы полагаем, что этот самый базисный материал пространства-времени, не позволяющий делить его на сколь угодно малые кусочки, чтобы не допустить сколь угодно больших флуктуаций, совсем не похож на крупномасштабное пространство-время, которое мы непосредственно переживаем. Поэтому фундаментальные составляющие пространства-времени, какими бы они ни были, вероятно, значительно трансформируются в результате усреднения, дающего известное нам пространство-время.

Таким образом, поиски известного нам пространства-времени в глубочайших законах природы могут быть подобны попыткам рассматривать Девятую симфонию Бетховена с помощью набора нот самих по себе, воспринимать полотна Моне как набор мазков. Подобно этим творениям человеческого гения целостное пространство-время может столь отличаться от своих частей, что на самом фундаментальном уровне не существует ничего похожего на известное нам пространство-время.

Преобразование геометрии

Другое соображение, называемое *геометрической дуальностью*, также указывает на то, что пространство-время может не быть фундаментальной реальностью, но указывает на это с совсем другой точки зрения. Для разъяснения этого соображения требуется больше технических деталей, чем для разъяснения квантового усреднения, так что не стесняйтесь лишь бегло пробежать по тем местам этого раздела, которые покажутся вам слишком трудными. Но поскольку многие исследователи считают данный материал одной из самых ярких черт теории струн, то стоит попытаться уловить его суть.

В главе 13 мы видели, как пять вариантов теории струн, кажущиеся различными, на самом деле являются разными формулировками одной и той же теории. Среди прочего мы подчеркнули, что это является очень мощным достижением, поскольку на некоторые чрезвычайно трудные вопросы, заданные в одном варианте теории, порою гораздо проще ответить в другом варианте. И это относится и к пространству-времени: трудность описания геометрической формы пространства-времени может

радикально меняться при переходе от одной формулировки струнной теории к другой. Вот что я имею в виду.

Поскольку теория струн требует более чем три пространственных измерения и одно временное, которые знакомы нам по повседневному опыту, в главах 12 и 13 мы поднимали вопрос о том, где могут скрываться эти дополнительные измерения. Мы пришли к тому, что они могут быть свёрнуты до таких микроскопических размеров, что мы неспособны обнаружить их экспериментально. Мы также установили, что физика известных нам больших измерений зависит от точной формы и размера дополнительных измерений, поскольку их геометрические свойства воздействуют на моды колебаний струн. Хорошо. Теперь вернёмся к части I.

Словарь, который переводит вопросы, поставленные в одном варианте теории струн, в вопросы, задаваемые в другом варианте теории струн, *также переводит геометрию дополнительных измерений первой теории в другую геометрию дополнительных измерений второй теории*. Если, к примеру, вы изучаете физические выводы, скажем, теории струн типа IIA с дополнительными измерениями, свёрнутыми до определённого размера и в определённую форму, то любой вывод этой теории может быть получен, по крайней мере в принципе, из переформулированных вопросов, скажем, теории струн типа IIB. Но при этом требуется, чтобы дополнительные измерения теории струн типа IIB были свёрнуты в точную геометрическую форму, зависящую от конкретной геометрической формы дополнительных измерений теории струн типа IIA, но, *как правило, отличающуюся от неё*. Короче говоря, один вариант теории струн с дополнительными измерениями, свёрнутыми в одну геометрическую форму, эквивалентен другому варианту теории струн с дополнительными измерениями, свёрнутыми в другую геометрическую форму.

И разница геометрий пространства-времени может и не быть незначительной. Например, теория струн типа IIA с дополнительным измерением, свёрнутым в окружность, как на рис. 12.7, полностью эквивалентна теории струн типа IIB с дополнительным измерением, тоже свёрнутым в окружность, но с *обратно* пропорциональным радиусом. Если одна окружность — крохотная, тогда другая — гигантская, и наоборот, и всё же нет никакого способа различить эти геометрии. (Если в единицах планковской длины радиус одной окружности равен R , тогда радиус другой окружности равен $1/R$). Вы можете подумать, что сможете легко и просто отличить большую окружность от маленькой, но в теории струн это не всегда так. Все результаты наблюдения, следующие из взаимодействия

струн, и две эти теории струн — типа IIA с большим циклическим измерением и типа IIB с маленьким циклическим измерением — являются попросту различными способами выражения одной и той же физики. Каждое наблюдение, описываемое в рамках одной теории струн, имеет альтернативное и столь же верное описание в рамках другой теории струн, даже если могут различаться языки теорий и даваемые ими интерпретации. (Такое возможно из-за того, что существует две принципиально разные конфигурации для струн, движущихся по циклическому измерению: струна может быть намотана на циклическое измерение подобно резиновой ленте вокруг консервной банки, и струна может находиться в циклическом измерении, не будучи намотанной на него. Энергия намотанной струны *пропорциональна* радиусу циклического измерения [чем больше радиус, тем длиннее намотанная струна и тем больше её энергия], тогда как ненамотанная струна имеет энергию, *обратно пропорциональную* радиусу циклического измерения [чем меньше радиус, тем сильнее зажата струна в пределах циклического измерения и тем больше энергия её движения в силу квантовой неопределённости]. Заметим, что если поменять радиус циклического измерения на *обратный* и одновременно поменять «намотанные» и «ненамотанные» струны, то энергетический спектр струн и, вообще, физика описываемого ими мира не изменится. Это в точности то, что требует словарь, переводящий теорию IIA в теорию IIB, и именно поэтому могут быть физически эквивалентны две различные геометрии — с малым и с большим радиусом дополнительного измерения.)

Сказанное остаётся верным и при замене простых циклических измерений на более сложные многообразия Калаби–Яу, введённые в главе 12. Одна теория струн с дополнительными измерениями, свёрнутыми в определённое многообразие Калаби–Яу, физически эквивалентна другой теории струн с дополнительными измерениями, свёрнутыми в другое многообразие Калаби–Яу (называемое *зеркальным* или *дуальным* многообразием). В этом случае могут отличаться не только размеры многообразий Калаби–Яу, но и их формы, включая количество и разновидности их отверстий. Но принцип физической эквивалентности теорий струн разного типа гарантирует, что несмотря на различие форм и размеров дополнительных измерений описываемые ими миры будут абсолютно идентичны физически. (В многообразиях Калаби–Яу существуют отверстия двух типов, но оказывается, что колебательные моды струн — а значит, и все физические следствия — чувствительны только к *разности* между количествами отверстий каждого типа. Так что если одно многообразие Калаби–Яу имеет, скажем, два отверстия первого типа и пять

отверстий второго типа, а другое многообразие Калаби–Яу имеет пять отверстий первого типа и два — второго, то эти два многообразия приводят к одной и той же физике, несмотря на различие геометрических форм этих многообразий).^[101]

Это с другой стороны поддерживает подозрение, что пространство не является фундаментальной концепцией. Один наблюдатель, описывающий Вселенную с помощью одного из пяти вариантов теории струн, заявит, что пространство, включая дополнительные измерения, имеет конкретную форму и конкретные размеры, тогда как другой наблюдатель, использующий другой вариант теории струн, возразит ему, сказав, что пространство, включая дополнительные измерения, имеет другую форму и другие размеры. Поскольку оба наблюдателя используют всего лишь разные *математические* описания одной и той же *физической* Вселенной, то нельзя сказать, что один из них прав, а другой — нет. Они оба правы, даже если разнятся их выводы о форме и размерах пространства. Отметим также, что это не похоже на то, что они нарезают пространство-время на слои разными, но одинаково законными способами, как это было в специальной теории относительности. Эти наблюдатели не придут к согласию относительно целостной структуры самого пространства-времени. И в этом всё дело. Если бы пространство-время было действительно фундаментально, то большинство физиков ожидало бы, что тогда всё, независимо от точки зрения и языка теории, пришли бы к согласию относительно свойств пространства-времени. Но тот факт, что по крайней мере в рамках теории струн это не обязательно так, говорит о том, что пространство-время может быть лишь вторичным явлением.

Следовательно, это ведёт нас к вопросу: если нити рассуждений, приведённые в двух последних разделах, ведут в верном направлении, так что известное нам пространство-время является лишь проявлением на крупных масштабах некой более фундаментальной сущности, то что это за сущность и каковы её свойства? На сегодня этого никто не знает. Но в поисках ответа исследователи нащупали новые путеводные нити, и самая главная нить возникла из размышлений о чёрных дырах.

На что указывает энтропия чёрной дыры?

Чёрные дыры являются самыми загадочными объектами Вселенной. Снаружи они кажутся очень простыми и различаются всего лишь тремя параметрами: массой (определяющей размер чёрной дыры, т. е. расстояние

от её центра до горизонта событий — поверхности вокруг чёрной дыры, после пересечения которой нет пути назад), электрическим зарядом и скоростью вращения. И это всё. Больше нет никаких деталей, определяющих облик чёрной дыры. Физики подытожили это фразой: «У чёрных дыр нет волос», подразумевая, что чёрные дыры лишены индивидуальных особенностей. Увидев одну чёрную дыру с заданной массой, зарядом и моментом вращения (хотя вы узнали о её параметрах не непосредственно, а через её воздействие на окружающий газ и звёзды, поскольку чёрные дыры действительно чёрные), вы тем самым увидели все чёрные дыры с такой же массой, зарядом и спином.

Тем не менее за внешней каменной «невозмутимостью» чёрной дыры скрывается величайший беспорядок, который только можно вообразить во Вселенной. Среди всех физических систем заданного размера чёрные дыры обладают самой большой энтропией. Вспомним из главы 6, что энтропия — это, грубо говоря, число всевозможных перестановок элементов данной физической системы, при которых её общий вид не меняется. Применяя это определение к чёрным дырам и даже не зная, из чего они состоят (поскольку мы не знаем, что происходит с материей, втянутой в чёрную дыру), мы можем с уверенностью сказать, что перестановка элементов чёрной дыры оказывает не большее влияние на её массу, заряд или спин, чем перестановка страниц книги «Война и мир» влияет на вес этой книги. А поскольку масса, заряд и момент вращения полностью определяют облик чёрной дыры для внешнего мира, то все такие манипуляции проходят незамеченными, что даёт нам основание говорить, что чёрная дыра имеет максимально возможную энтропию.

Несмотря на это, вы могли бы предложить следующий простой способ превзойти энтропию чёрной дыры. Вообразите пустую сферу того же размера, что и размер чёрной дыры, и начните наполнять её газом (водородом, гелием, углекислым газом, чем угодно), который может свободно распространяться внутри этой сферы. Чем больше газа вы закачиваете, тем выше энтропия, поскольку большее число составляющих элементов означает большее количество всевозможных перестановок. Тогда вы могли бы предположить, что по мере закачки газа энтропия будет всё время расти и расти, так что в определённый момент превзойдёт энтропию чёрной дыры того же размера. Эта стратегия хитра, но общая теория относительности показывает, что она неверна. Дело в том, что по мере закачки газа растёт и масса сферы. И ещё до того как энтропия сферы достигнет энтропии чёрной дыры того же размера, масса сферы достигнет критического значения, при котором сфера со всем своим содержимым

становится чёрной дырой. И нет способа обойти это. Чёрные дыры обладают монополией на максимально возможный беспорядок.

А что если попытаться дальше увеличивать энтропию самой чёрной дыры, продолжая закачивать в неё газ? Энтропия действительно будет продолжать расти, но у вас уже изменились правила игры. По мере исчезновения материи за горизонтом событий чёрной дыры будет расти не только её энтропия, *но и её размер*. Размер чёрной дыры пропорционален её массе, так что чем больше материи вы закачиваете в чёрную дыру, тем тяжелее и объемнее она становится. Таким образом, любая попытка увеличить энтропию в заданной области пространства после того, как эту область заняла чёрная дыра, проваливается. Эта область не может поддерживать больше беспорядка. Энтропия достигла в ней своего насыщения. И что бы вы ни делали — закачивали бы газ в чёрную дыру или бросали бы в неё тяжёлые армейские грузовики — от этого чёрная дыра будет только расти и занимать всё большую область пространства. Таким образом, количество энтропии, заключённой в чёрной дыре, не только является фундаментальным свойством чёрной дыры, но и говорит нам о чём-то фундаментальном, касающемся самого пространства: *максимальное количество энтропии, которую можно вместить в заданную область пространства — любую область, где угодно, в любое время, — равняется количеству энтропии, содержащейся в чёрной дыре того же размера.*

А сколько энтропии содержит чёрная дыра заданного размера? Вот где начинается самое интересное. Начнём свои рассуждения с чего-то наглядного, наподобие воздуха в тапперуэровском контейнере^[102]. Если вы соедините два таких контейнера, удвоив их общий объём и количество содержащихся в них молекул воздуха, то можно подумать, что тем самым вы удвоите и энтропию. Точные расчёты подтверждают это предположение^[209] и тем самым показывают, что при прочих равных условиях (неизменная температура, плотность и т. д.) энтропия известных нам физических систем пропорциональна их объёму. Следующим шагом можно предположить, что энтропия и менее знакомых нам систем, таких как чёрные дыры, тоже пропорциональна их объёму.

Но в 1970-х гг. Якоб Бекенштейн и Стивен Хокинг обнаружили, что это не так. Их математический анализ показал, что энтропия чёрной дыры пропорциональна не её объёму, а *площади* её горизонта событий — грубо говоря, площади её поверхности. Это ответ очень отличается от того, что мы ожидали. Если удвоить радиус чёрной дыры, то её объём увеличится в 8

раз (2^3), тогда как площадь её поверхности возрастет только в 4 раза (2^2); если в 100 раз увеличить радиус чёрной дыры, то её объём увеличится в миллион раз (100^3), тогда как площадь её поверхности возрастет только в десять тысяч раз (100^2). У чёрных дыр гораздо больше объёма, чем поверхности.^{210} Таким образом, хотя чёрные дыры содержат предельно возможное количество энтропии, но Бекенштейн и Хокинг показали, что это количество меньше, чем мы могли бы по наивности полагать. Пропорциональность энтропии площади поверхности является не просто любопытным различием между чёрными дырами и тапперуэровскими контейнерами, о которых мы ранее упомянули и быстро пошли дальше. Мы видели, что чёрные дыры устанавливают предел количеству энтропии, которое в принципе может быть вмещено в заданную область пространства: возьмите чёрную дыру точно такого же размера и найдите её энтропию — это и будет абсолютным пределом энтропии, которую может содержать заданная область пространства. И поскольку, согласно работам Бекенштейна и Хокинга, эта предельная энтропия пропорциональна площади поверхности чёрной дыры, которая занимала бы заданную область, значит, максимальное количество энтропии, которое может содержаться в заданной области пространства, пропорционально площади её поверхности.^{211}

Легко выявить причину расхождения этого вывода с тем, что мы нашли, рассуждая о воздухе в тапперуэровском контейнере (когда мы установили, что энтропия пропорциональна объёму контейнера, а не площади его поверхности): поскольку мы предположили, что воздух однородно распределяется внутри контейнера, то тем самым мы игнорировали гравитацию; ведь когда гравитация существенна, происходит сгущение. Игнорировать гравитацию можно в случае низкой плотности частиц, но при большой энтропии плотность высока, так что гравитация существенна, и перестаёт быть справедливым рассуждение, применённое к тапперуэровскому контейнеру. Экстремальные условия требуют учёта гравитации, что и приводит к тому, что максимально возможное количество энтропии, содержащейся в заданной области пространства, пропорционально площади её поверхности, а не её объёму.

Хорошо, но почему это должно нас интересовать? На это есть две причины.

Во-первых, существование предела энтропии даёт ещё одно указание на то, что ультрамикроскопическое пространство имеет атомизированную структуру. Согласно Бекенштейну и Хокингу, если вообразить, что на

плоскости горизонта событий чёрной дыры расчерчена шахматная доска с клетками размера планковской длины (так что каждая «планковская клетка» имеет площадь 10^{-66} см²), то энтропия чёрной дыры равна количеству таких клеток, уместившихся на горизонте событий.^{212} Отсюда неизбежен вывод: планковская клетка является минимальным, фундаментальным элементом пространства, и каждая такая клетка несёт минимальный, единичный элемент энтропии. Это значит, что ничего, даже в принципе, не может происходить *внутри* планковской клетки, поскольку любое перемещение является потенциальным источником беспорядка, для создания которого требуется более чем один элемент энтропии в пределах планковской клетки. Таким образом, с совсем другой точки зрения мы снова пришли к представлению о существовании сущностного пространственного элемента.^{213}

Во-вторых, верхний предел энтропии в заданной области пространства является для физика критической, почти священной величиной. Чтобы понять причину этого, вообразите, что вы помогаете психиатру, и ваша работа состоит в том, чтобы детально записывать всё, что происходит в группе гиперактивных детей. Каждое утро вы молитесь, чтобы дети как можно спокойнее себя вели, поскольку чем больший бедлам они устраивают, тем труднее ваша работа. Причина очень проста, но стоит явно сказать: чем более беспорядочно ведут себя дети, тем за большим количеством вещей вам требуется следить. Вселенная бросает физику во многом тот же вызов. Фундаментальная физическая теория должна описывать всё, что происходит — или могло было произойти, даже в принципе, — в заданной области пространства. И, как и в случае с детьми, чем больший беспорядок может содержать область пространства — даже в принципе — тем больше должна уметь отслеживать теория. Таким образом, максимальная энтропия в области пространства может служить своеобразной «лакмусовой бумажкой»: физики полагают, что по-настоящему фундаментальная теория — это та, которая полностью согласуется с максимальной энтропией в любой заданной области пространства. Теория должна соответствовать природе с такой точностью, чтобы быть в состоянии *точно* отследить максимально возможный беспорядок в любой области пространства, не больше и не меньше.

Если бы рассуждения, касавшиеся тапперуэровского контейнера, были бы универсально справедливы, то фундаментальная теория должна была бы учитывать «объёмное» количество беспорядка в любой области. Но поскольку эти рассуждения оказываются неверными при учёте гравитации

— а фундаментальная теория должна включать гравитацию, то фундаментальной теории требуется принимать во внимание лишь «поверхностный» беспорядок в любой области. И на паре примеров мы уже показали, что для больших областей «поверхностный» беспорядок гораздо меньше «объёмного».

Таким образом, результат Бекенштейна и Хокинга говорит нам о том, что теория, включающая гравитацию, в некотором смысле проще теории, не включающей её. В ней меньше «степеней свободы» (меньше составляющих, которые могут меняться и тем самым вносить свой вклад в беспорядок), которые теория должна описывать. Этот вывод интересен сам по себе, но если сделать ещё один шаг вперёд, то он приведёт нас к кое-чему чрезвычайно необычному. Если максимум энтропии в любой заданной области пространства пропорционален площади поверхности этой области, а не её объёму, тогда, возможно, подлинные, фундаментальные степени свободы — атрибуты, способные вызывать беспорядок, — *на самом деле пребывают на поверхности области, а не внутри неё*. То есть возможно, что реальные физические процессы Вселенной происходят на тонкой удалённой поверхности, окружающей нас, а всё, что мы видим и переживаем, является попросту проекцией тех процессов. Иными словами, возможно, что Вселенная подобна голограмме.

Это очень странная идея, но, как мы сейчас увидим, она недавно получила значительную поддержку.

Является ли Вселенная голограммой?

Голограмма — это двумерный кусок пластика со специальной гравировкой, который при освещении подходящим лазерным светом проецирует трёхмерное изображение.^{[\[214\]](#)} В начале 1990-х гг. лауреат Нобелевской премии голландский физик Герард 'т Хофт и Леонард Сасскинд, один из основателей теории струн, предположили, что сама Вселенная может функционировать подобно голограмме. Они выдвинули потрясающую идею, что всё, что происходит в трёх измерениях повседневной жизни, может быть голографической проекцией физических процессов, происходящих на удалённой двумерной поверхности. С их новой, совершенно непривычной для нас точки зрения, мы и всё, что мы делаем или видим, сродни голографическим образам. Тогда как Платон считал обычные ощущения отображающими лишь тень реальности, голографический принцип говорит похожее, но переворачивает эту

метафору с ног на голову. Тени — то, что плоское и, следовательно, пребывает на двумерной поверхности, — реальны, тогда как то, что кажется нам более богато структурированными объектами более высокой размерности (мы сами и мир вокруг нас) является эфемерной проекцией этих теней. [\[103\]](#)

Несмотря на то что это чрезвычайно странная идея, и её роль в окончательном понимании пространства-времени далеко не ясна, так называемый *голографический принцип* 'т Хофта и Сасскинда имеет под собой веские основания. Ведь, как мы узнали в последнем разделе, максимальное количество энтропии, которое может вмещать определённая область пространства, пропорционально площади её поверхности, а не её объёму. Поэтому естественно предположить, что наиболее фундаментальные ингредиенты Вселенной, её самые базисные степени свободы — элементы, которые могут быть носителями энтропии Вселенной почти как страницы романа «Война и мир» несут свою энтропию, — пребывают на граничной поверхности, а не внутри Вселенной. То, что мы переживаем в «объёме» Вселенной, определяется тем, что происходит на граничной поверхности, аналогично тому, как трёхмерное голографическое изображение определяется информацией, закодированной в плоской голографической маске. Законы физики уподобляются вселенскому лазеру, освещающему реальные космические процессы, происходящие на тонкой удалённой поверхности, и генерирующему голографические иллюзии повседневной жизни.

Мы ещё не понимаем, как этот голографический принцип может быть реализован в реальном мире. Одна из проблем состоит в том, что обычно Вселенная представляется либо простирающейся до бесконечности, либо замкнутой на себя подобно сфере или экрану компьютерной игры (как в главе 8) и, следовательно, не имеющей каких-либо краёв или границ. Так где же может находиться «граничная голографическая поверхность»? Более того, нам определённо видится, что физические процессы находятся под нашим контролем прямо здесь в «объёме» Вселенной. Нам не кажется, что нечто на неуловимой границе как-то распоряжается тем, что происходит здесь, внутри. Означает ли голографический принцип, что наше ощущение управления и автономии иллюзорно? Или же лучше думать о голографическом принципе как о выражающем некоторую дуальность, позволяющую в зависимости от вкуса (а не от реальной физики) выбирать привычное описание, в котором фундаментальные законы действуют здесь, в «объёме» (что согласуется с нашей интуицией и нашим восприятием), либо необычное описание, в котором фундаментальные физические

процессы происходят на некой границе Вселенной, и при этом каждая точка зрения будет одинаково законной? Эти существенные вопросы до сих пор остаются дискуссионными.

Но в 1997 г. аргентинский физик Хуан Малдасена, основываясь на ряде ранних догадок физиков, занимавшихся теорией струн, сделал крупный прорыв, который значительно продвинул понимание этих вопросов. Его открытие не связано прямо с вопросом о роли голографии в нашей реальной Вселенной, но он нашёл гипотетический контекст — гипотетическую Вселенную, для которой абстрактные рассуждения о голографии могут стать конкретными и математически точными. По техническим причинам Малдасена изучал гипотетическую Вселенную с четырьмя большими пространственными измерениями и одним временным измерением и с постоянной отрицательной кривизной (в трёхмерном пространстве постоянную отрицательную кривизну имеет седлообразная поверхность, знакомая широкой публике по форме картофельных чипсов «Принглс», рис. 8.6в). Стандартный математический анализ показывает, что это пятимерное пространство-время обладает границей,^[215] имеющей, как и все границы, на одно измерение меньше, чем окружаемая ею область, т. е. у этой границы три пространственных и одно временное измерение. (Как всегда, трудно представить себе пространство высокой размерности, но если вы хотите иметь мысленную картинку, то подумайте о банке с томатной пастой — трёхмерная жидкая томатная паста будет играть роль пятимерного пространства-времени, а её двумерная поверхность — роль четырёхмерной пространственно-временной границы.) Включив дополнительные свёрнутые измерения, требуемые теорией струн, Малдасена убедительно показал, что все физические процессы, воспринимаемые наблюдателем, живущим внутри этой Вселенной (в «пасте»), можно полностью описать в терминах физических законов, действующих на границе этой Вселенной (на поверхности банки).

Хотя мы и не знаем подобной Вселенной, но эта работа дала первый и математически строгий пример, в котором был явно реализован голографический принцип.^[216] Она пролила свет на применимость голографического представления ко всей Вселенной. Например, в работе Малдасены «объёмное» и «граничное» описания имеют совершенно равные права. Ни одно из них не является первичным, а другое — вторичным. Подобно взаимосвязи между пятью вариантами теории струн, «объёмная» и «граничная» теории переходят друг в друга. Однако в этом переходе необычно то, что «объёмная» теория имеет больше измерений,

чем эквивалентная ей теория, сформулированная на границе. Более того, расчёты показывают, что тогда как «объёмная» теория включает гравитацию (поскольку Малдасена сформулировал её с помощью теории струн), «граничная» теория её не включает. Тем не менее любой вопрос (или расчёт) одной теории может быть переформулирован в эквивалентный вопрос (или расчёт) другой теории. Не знакомый с этой дуальностью может подумать, что соответствующие вопросы и расчёты не имеют ничего общего друг с другом (например, поскольку «граничная» теория не включает гравитацию, то вопросы в «объёмной» теории, включающие гравитацию, переводятся в совсем по другому сформулированные вопросы «граничной» теории, не включающие гравитацию), тогда как знаток обеих теорий увидит их взаимосвязь и поймёт, что ответы на соответствующие вопросы и результаты соответствующих вычислений должны согласовываться друг с другом. И действительно, все проведённые к настоящему времени расчёты (а их множество) подтверждают это утверждение.

Трудно полностью охватить детали всего этого, но пусть это не затмевает главное. Результат Малдасены изумителен. Он нашёл конкретную, пусть и гипотетическую реализацию голографического принципа в рамках теории струн. Он показал, что определённая квантовая теория, не включающая гравитацию, переходит в другую квантовую теорию, включающую гравитацию, но сформулированную для пространства, в котором на одно измерение больше. Запущены мощные исследовательские программы, стремящиеся применить эти идеи к более реалистичной Вселенной, нашей Вселенной, но прогресс медленен, так как эти исследования сталкиваются с техническими трудностями. (Малдасена выбрал свой гипотетический пример из тех соображений, что он относительно легко поддаётся математическому анализу; гораздо труднее иметь дело с более реалистичными примерами.) Тем не менее теперь мы знаем, что теория струн, по крайней мере в определённом контексте, может поддерживать голографическую концепцию. И, как и в случае с преобразованием геометрии, упомянутым ранее, это даёт другой намёк на то, что пространство-время не является фундаментальной концепцией. При переходе от одной теоретической формулировки к другой эквивалентной формулировке может меняться не только характерный размер и форма пространства-времени, но и *количество* пространственных измерений.

Всё больше указаний на то, что форма пространства-времени является скорее чем-то внешним, меняющимся от одной формулировки физической теории к другой, а не фундаментальным элементом реальности. Подобно

тому как разнится количество букв, слогов и гласных в английском слове «cat» и в его переводе на испанский язык «gato», так и форма, характерные размеры и даже количество измерений пространства-времени меняются при переводе с языка одной теории на язык другой. Для любого данного наблюдателя, использующего одну из теорий, пространство-время может казаться реальным и обязательным. Но как только наблюдатель сменит формулировку теории на эквивалентную, но отличающуюся от прежней, так сразу же обязательно изменится то, что раньше казалось ему реальным и непреложным. Таким образом, если эти идеи верны — а я должен подчеркнуть, что их ещё следует досконально проверить, хотя у теоретиков накопилось громадное количество подтверждений, — то они вызывают сильные сомнения в первичности пространства и времени.

Из всех путеводных нитей, которые здесь обсуждались, я бы назвал голографический принцип самым перспективным для того, чтобы сыграть доминирующую роль в будущих исследованиях. Этот принцип возникает из базисной характеристики чёрных дыр — их энтропии, — понимание которой, с чем согласятся многие физики, покоится на прочном теоретическом основании. Даже если детали наших теорий изменятся, мы ожидаем, что любое здоровое описание гравитации будет допускать существование чёрных дыр, и, следовательно, останется ограничение на максимально возможную энтропию в данной области пространства, так что голографический принцип будет применим. Тот факт, что теория струн естественным образом включает в себя голографический принцип (по крайней мере в примерах, поддающихся математическому анализу), является другим веским доводом в пользу справедливости этого принципа. Я полагаю, что независимо от того, куда может завести нас поиск оснований пространства и времени, независимо от модификаций теории струн / М-теории, которые могут ожидать нас на последнем этапе, принцип голографии будет продолжать оставаться ведущей концепцией.

Составляющие пространства-времени

На протяжении всей книги мы периодически ссылались на ультрамикроскопические составляющие пространства-времени, но хотя мы и привели косвенные аргументы в пользу их существования, мы ещё ничего не сказали о том, чем на самом деле могут быть эти составляющие. И на то есть веская причина. На самом деле у нас нет ни малейшего представления о том, каковы они. Или, может быть, лучше сказать, что

когда дело доходит до идентификации элементарных составляющих пространства-времени, у нас ни в чём нет уверенности. Это главный пробел в нашем понимании, но стоит взглянуть на эту проблему в историческом контексте.

Если бы вы спросили учёных в конце XIX-го в., каковы элементарные составляющие материи, то не получили бы единогласного ответа. Всего лишь столетие назад атомная гипотеза не была общепризнанной; были даже знаменитые учёные (Эрнст Мах — один из них), считавшие её неверной. Более того, даже после того как атомная гипотеза была широко принята в начале XX-го в., учёные постоянно обновляли рисуемую ею картину, находя всё более элементарные компоненты (например, сначала протоны и нейтроны, затем кварки). Теория струн — самый последний шаг на этом пути, но поскольку её ещё требуется подтвердить экспериментально (и даже после этого может появиться ещё более тонкая теория), то мы должны открыто признать, что поиск самых базисных компонентов материи всё ещё продолжается.

Включение пространства и времени в современный научный контекст восходит к работам Ньютона XVII-го в., но серьёзные размышления об их микроскопическом строении потребовали открытия общей теории относительности и квантовой механики, произошедших только в XX-м в. Таким образом, на историческом масштабе мы только начали анализировать пространство-время, так что отсутствие определённых предположений о его «атомах» — самых элементарных составляющих пространства-времени — не является «чёрной меткой». Это далеко не так. То, что мы открыли многочисленные характеристики пространства и времени далеко за пределами обычного опыта, свидетельствует о прогрессе, немислимом ещё столетие назад. Поиск самых фундаментальных компонентов материи или пространства-времени является грандиозной задачей, которая, вероятно, будет занимать нас ещё немалое время.

Есть два многообещающих направления в поисках элементарных составляющих пространства-времени. Одно предположение исходит из теории струн, а второе — из теории, известной как *петлевая квантовая гравитация*.

Предложение, исходящее из теории струн, либо интуитивно притягивает, либо совершенно сбивает с толку — в зависимости от того, насколько глубоко вы раздумываете над этим. Поскольку мы говорим о «ткани» пространства-времени, то предположение состоит в том, что, возможно, пространство-время соткано из струн наподобие того, как

рубашка соткана из нитей. То есть подобно тому как соединение должным образом многочисленных нитей порождает ткань рубашки, возможно, соединение должным образом многочисленных струн порождает то, что мы обычно называем тканью пространства-времени. Тогда материя (как вы и я) состоит из дополнительных агломераций вибрирующих струн, движущихся внутри среды, сотканной струнами пространства-времени — подобно звонкой музыке на фоне приглушённого гула или тонкому узору на однородном материале.

Это предположение кажется мне притягательным и неотразимым, но до сих пор никто не превратил эти слова в точное математическое утверждение. Насколько я могу судить, препятствия на этом пути далеко не пустяковые. Например, если ваша рубашка полностью распадётся на отдельные нити, то вы останетесь с грудой ниток — этот исход, в зависимости от обстоятельств, вы можете посчитать неловким или раздражающим, хотя, вероятно, и не глубоко загадочным. Но что действительно весьма напрягает разум (мой разум, по крайней мере), так это мысль об аналогичной ситуации со струнами пространства-времени. Что нам делать с «грудой» струн, выпавших из ткани пространства-времени или, что, возможно, ближе к делу, ещё не объединённых в ткань пространства-времени? Можно поддаться искушению думать о них как о нитях рубашки — как о сыром материале, который требуется соткать, — но сразу же видна несостоятельность такого подхода. Ведь мы представляем струны вибрирующими в пространстве и времени, но без ткани пространства-времени, образуемой самими этими струнами, *нет пространства и времени*. На этом пути концепция пространства и времени бессмысленна, пока не сплетаются неисчислимые струны, образующие само пространство и время.

Таким образом, чтобы сделать осмысленным это предложение, для описания струн нам требуются рамки, которые с самого начала не предполагали бы, что струны вибрируют в предсуществующем пространстве-времени. Нам требуется полностью беспространственная и безвременная формулировка теории струн, в которой пространство-время возникало бы из коллективного поведения струн.

И хотя на этом пути имеется прогресс, никто ещё не предложил такую беспространственную и безвременную формулировку струнной теории — нечто, что физики называют формулировкой, *независимой от фона* (этот термин возник из популярного представления о пространстве-времени как о фоне, на котором происходят физические явления). Вместо этого, по сути, во всех подходах струны представляются движущимися и вибрирующими в

пространстве-времени, введённом в теорию «вручную»; пространство-время не возникает из теории, как должно быть в «независимой от фона» концепции, а вводится в теорию самим теоретиком. Многие исследователи считают разработку «независимой от фона» формулировки единственной наиболее значительной нерешённой проблемой теории струн. Её решение не только привело бы к пониманию основ пространства-времени, но независимые от фона рамки, возможно, дали бы инструмент для решения основной «загвоздки», описанной в конце главы 12, — неспособности теории выбрать геометрическую форму дополнительных измерений. Как только базисный математический формализм теории будет отделён от любого частного пространства-времени, так теория струн могла бы оказаться в состоянии охватить все возможные геометрические формы дополнительных измерений и, возможно, выбрать одну из них.

Другой трудностью, с которой сталкивается предположение о «струнной структуре» пространства-времени, является то, что теория струн имеет и другие компоненты помимо струн (мы видели это в главе 13). Какую роль играют эти другие компоненты в фундаментальном строении пространства-времени? Этот вопрос становится особенно острым в модели мира на бране. Если трёхмерное пространство нашего опыта является 3-браной, то является ли сама эта брана неделимой или же она состоит из других компонентов теории? Например, состоят ли браны из струн или же как струны, так и браны — элементарные сущности? Или же следует допустить ещё одну возможность — что браны и струны состоят из ещё более тонких ингредиентов? Эти вопросы находятся на переднем крае текущих исследований, но поскольку в данной главе мы говорим о намёках и путеводных нитях дальнейших исследований, то позвольте мне рассказать об одной важной идее, привлёкшей большое внимание.

Ранее мы говорили о разнообразных бранах теории струн / М-теории: 1-бранах, 2-бранах, 3-бранах, 4-бранах и т. д. Хотя я и не подчёркивал это ранее, но в теории также существуют 0-браны — компоненты, не имеющие пространственных измерений подобно точечным частицам. Это может показаться противоречащим всему духу струнной теории / М-теории, отошедшей от представления о точечных частицах, дабы укротить необузданные флуктуации квантовой гравитации. Однако 0-браны, как и их собратья с большим количеством измерений на рис. 13.2, появляются буквально с прикреплёнными к ним струнами, и, следовательно, их взаимодействие управляется струнами. Поэтому неудивительно, что 0-браны ведут себя совсем не так, как обычные точечные частицы, и, что важнее всего, они полностью принимают участие в разглаживании и

ослаблении ультрамикроскопических флуктуаций пространства-времени; 0-браны не вносят фатальных изъянов, проявляющихся при попытках объединить квантовую механику с общей теорией относительности в рамках представлений о точечных частицах.

В действительности Том Бэнкс из университета Ратгерса, Вилли Фишлер из Техасского университета в Остине вместе с Леонардом Сасскиндом и Стивеном Шенкером (оба теперь в Стэнфорде), сформулировали версию теории струн / М-теории, в которой 0-браны являются фундаментальными ингредиентами, из которых могут состоять струны и прочие браны более высокой размерности. Их предположение, известное также как *матричная теория* (вот и ещё один вариант расшифровки буквы «М» в «М-теории»), вызвало лавину исследований, но математические трудности до сих пор препятствуют учёным разработать этот подход до конца. Тем не менее те вычисления, которые удалось провести в рамках этого подхода, подтверждают выдвинутое предположение. Если матричная теория верна, то это может означать, что всё (струны, браны и, возможно, даже само пространство и время) состоит из соответствующих агрегатов 0-бран. Это захватывающая перспектива, и исследователи проявляют осторожный оптимизм по поводу того, что в этом направлении в ближайшие несколько лет будет достигнут существенный прогресс.

До сих пор мы говорили о пути, которым в поисках ингредиентов пространства-времени следуют приверженцы теории струн, но, как я упомянул, есть и второй путь, которого придерживаются последователи теории петлевой квантовой гравитации — основного конкурента теории струн. Теория петлевой квантовой гравитации, появившаяся в середине 1980-х гг., является другим многообещающим кандидатом на объединение квантовой механики с общей теорией относительности. Я не буду подробно говорить об этой теории (если она вас интересует, прочтите превосходную книгу Ли Смолина «Три дороги к квантовой гравитации»), а вместо этого укажу на несколько основных моментов, относящихся к нашему обсуждению.

Теория струн и теория петлевой квантовой гравитации заявляют, что они могут достигнуть долгожданной цели создания квантовой теории гравитации, но сделают это совсем разными путями. Теория струн возникла из десятилетних поисков наиболее элементарных компонентов материи; в самом начале для сторонников теории струн гравитация была, в лучшем случае, вторичным вопросом. В противоположность этому, теория петлевой квантовой гравитации выросла на традициях общей теории

относительности; для большинства приверженцев этого подхода гравитация всегда была в центре внимания. Если в одном предложении сформулировать различие подходов, то можно сказать, что теория струн идёт от малого (квантовая теория) к большому (гравитация), тогда как теория петлевой квантовой гравитации идёт от большого (гравитация) к малому (квантовая теория).^[217] В самом деле, как об этом говорилось в главе 12, теория струн изначально разрабатывалась как квантовая теория сильного ядерного взаимодействия; и только позже, почти по счастливой случайности, было обнаружено, что эта теория в действительности включает гравитацию. Теория петлевой квантовой гравитации, напротив, исходит из общей теории относительности Эйнштейна и стремится включить квантовую механику.

Этот старт с противоположного конца пространственных масштабов отражается в путях развития обеих теорий. Основные достижения одной теории оказываются, до некоторой степени, изъясними другой. Например, теория струн объединяет всю материю и все силы, включая гравитацию (такое полное объединение ускользает от теории петлевой квантовой гравитации), описывая всё на языке вибрирующих струн. Гравитационная частица — гравитон — представляет собой всего лишь одну из колебательных мод струны, и, стало быть, эта теория естественным образом описывает, как эти элементарные сгустки гравитации движутся и взаимодействуют на уровне квантовой механики. Однако, как только что было отмечено, основной изъян текущих формулировок теории струн состоит в том, что они предполагают наличие «фоновое пространства-времени», в котором струны движутся и вибрируют. В противоположность этому, основное (и впечатляющее) достижение теории петлевой квантовой гравитации состоит в том, что она *не* предполагает наличие «фоновое пространства-времени». Теория петлевой квантовой гравитации является конструкцией, «независимой от фона». Однако получение обычного пространства и времени, как и достижение известных результатов общей теории относительности на крупных масштабах (что относительно легко получается в рамках существующих формулировок теории струн), когда за стартовую точку берётся необычная беспространственная/безвременная концепция, является далеко нетривиальной проблемой, которую пытаются решить исследователи. Более того, по сравнению с теорией струн, теория петлевой квантовой гравитации достигла гораздо меньших успехов в понимании динамики гравитонов.

Одной из возможностей для гармонизации является то, что последователи теории струн и приверженцы теории петлевой квантовой

гравитации на самом деле строят одну и ту же теорию, но с совершенно разных стартовых позиций. На это указывает то обстоятельство, что обе теории включают петли, — в теории струн это петли, образуемые замкнутыми струнами; в теории петлевой квантовой гравитации петли труднее описать без использования математики, но, грубо говоря, эти петли суть элементарные петли пространства. Эта возможность подкрепляется и тем фактом, что теории полностью согласуются друг с другом в тех немногих задачах (таких как определение энтропии чёрной дыры), которые можно решить в рамках обоих подходов.^[218] И, что касается вопросов составляющих пространства-времени, обе теории предполагают существование некой атомизированной структуры. Мы уже видели намёки на это в рамках теории струн; аналогичные намёки в рамках теории петлевой квантовой гравитации ещё более настоятельные и даже более явные. Исследователи показали, что многочисленные петли теории петлевой квантовой гравитации могут соединяться (в чём-то подобно тому, как петли шерсти сплетаются в свитер), образуя структуры, которые на крупных масштабах выглядят приблизительно как области знакомого нам пространства-времени. Более того, исследователи подсчитали допустимое значение площади поверхности таких областей пространства. И оказалось, что площадь поверхности может составлять лишь целое число клеток площадью в планковскую единицу длины в квадрате, т. е. одна планковская клетка, две планковских клетки, 202 планковских клетки, но недопустимо дробное число клеток — подобно тому как может быть 1 электрон, 2 электрона, 202 электрона, но не может быть 1,6 электрона или любое дробное число электронов. Опять же, это является сильным аргументом в пользу того, что пространство, как и электроны, дискретно и состоит из неделимых элементов.^[219]

Если бы я рискнул сделать предсказание, то в качестве наиболее вероятного пути развития предположил бы, что «независимые от фона» методы, развитые в теории петлевой квантовой гравитации, будут приспособлены к теории струн, что даст дорогу для создания «независимой от фона» формулировки теории струн. И я полагаю, что от этой искры возгорится пламя третьей революции теории суперструн, в ходе которой будут разгаданы (я оптимист) многие из оставшихся глубоких тайн. На этом пути, вероятно, могла бы завершиться долгая история дебатов о пространстве-времени. С первых глав мы следили за «маятником мнений», раскачивающимся между релятивистским и абсолютистским взглядами на пространство, время и пространство-время. Мы спрашивали: представляет

ли пространство собой нечто? Является ли чем-то пространство-время? И, следя за ходом мысли на протяжении нескольких столетий, мы познакомились с различными точками зрения. Я думаю, что экспериментально подтверждённый, «независимый от фона» союз между общей теорией относительности и квантовой механикой приведёт к удовлетворительному решению этой проблемы. Благодаря «независимости от фона» ингредиенты теории могут оказаться в определённой связи друг с другом, но при отсутствии пространства-времени, изначально введённого в теорию, не будет никакой «фоновой арены», в которую они были бы встроены. Имели бы значения только относительные связи — это решение было бы во многом в духе Лейбница и Маха. Затем, по мере того как ингредиенты теории (будь то струны, браны, петли или что-либо ещё, что будет открыто в ходе будущих исследований) соединяются, образуя известное нам крупномасштабное пространство-время (либо наше реальное пространство-время, либо гипотетические примеры, полезные для мысленных экспериментов), они снова начинают быть «чем-то», во многом подобным тому, что было в нашем раннем обсуждении общей теории относительности: в совершенно пустом, плоском, бесконечном пространстве-времени (один из полезных гипотетических примеров) поверхность воды во вращающемся ведре Ньютона примет вогнутую форму. Самое существенное то, что при таком описании почти совсем исчезнет различие между пространством-временем и более ощутимыми материальными элементами, поскольку и то, и другое будет возникать как совокупность более элементарных ингредиентов в фундаментально реляционной, беспространственной и безвременной теории. Вот как Лейбниц, Ньютон, Мах и Эйнштейн могли бы провозгласить общую победу.

Внутреннее и внешнее пространство

Спекуляции о будущем науки являются увлекательным и конструктивным опытом. Они помещают наши текущие исследования в более широкий контекст и выделяют высшие цели, для достижения которых мы неторопливо и вдумчиво работаем. Но когда такие рассуждения касаются будущего самого пространства-времени, они обретают почти мистический характер, поскольку мы рассматриваем участь тех самых вещей, которые господствуют над нашим ощущением реальности. Опять же, нет сомнений в том, что независимо от наших

будущих открытий пространство и время будут продолжать обрамлять наш индивидуальный опыт; пространство и время, как и всё происходящее в жизни, останутся на своём месте. А то, что будет продолжать изменяться и, вероятно, радикально изменится, так это наше понимание предоставляемого ими каркаса, т. е. арены экспериментальной реальности. После столетий размышлений мы можем охарактеризовать пространство и время только как самых знакомых незнакомцев. Они невозмутимо держат путь через наши жизни, но умело скрывают своё фундаментальное строение от тех самых ощущений, которые они так наполняют и на которые они влияют.

За последнее столетие благодаря двум теориям относительности Эйнштейна и квантовой механике мы близко познакомились с некоторыми ранее скрытыми чертами пространства и времени. Замедление времени, относительность одновременности, альтернативное «нарезание на куски» пространства-времени, гравитация как искажение и искривление пространства и времени, вероятностная природа реальности и квантовое дальное действие — даже самые лучшие физики XIX го в. не ожидали, что всё это обнаружится буквально за углом. И всё же, это всё есть — подтверждённое как экспериментальными результатами, так и теорией.

В наш век мы столкнулись со множеством неожиданных идей:

- тёмная материя и тёмная энергия несомненно являются основными составляющими Вселенной;
- гравитационные волны — рябь ткани пространства-времени, — которые были предсказаны общей теорией относительности Эйнштейна и которые когда-нибудь смогут позволить нам заглянуть ещё дальше в прошлое, чем когда-либо ранее;
- океан Хиггса, который пронизывает всё пространство и который, возможно, поможет нам понять, как частицы обретают массу;
- инфляционное расширение, которое может объяснить форму космоса и решить загадку его однородности на больших масштабах, а также установить направление стрелы времени;
- теория струн, которая постулирует петли и отрезки энергии вместо точечных частиц и обещает реализовать мечту Эйнштейна об объединении всех частиц и сил в рамках единой теории;
- дополнительные пространственные измерения, которые возникли из математики теории струн и которые могут быть обнаружены в экспериментах на новых ускорителях в следующем десятилетии;
- мир бран, в котором наши три пространственных измерения могут соответствовать лишь одной Вселенной среди множества Вселенных,

плавающих в пространстве-времени более высокой размерности;

- и, возможно, даже новое понятие о пространстве-времени, когда сама ткань пространства и времени состоит из более фундаментальных беспространственных и безвременных элементов.

В следующем десятилетии более мощные ускорители дадут так необходимые экспериментальные данные, и многие физики уверены, что результаты, полученные из наблюдений высокоэнергетических столкновений, подтвердят ряд кардинальных теоретических построений. Я разделяю этот энтузиазм и с нетерпением жду результатов. Пока наши теории не соприкоснутся с наблюдаемыми, проверяемыми явлениями, они будут подвешены в состоянии неопределённости, оставаясь обещающим набором идей, который может иметь или не иметь отношение к реальному миру. Новые ускорители значительно расширят поле перекрытия между теорией и экспериментом и, как надеются физики, переведут многие из этих идей в область признанной науки.

Но есть и другой подход, наполняющий меня несравненным изумлением, хотя у этого подхода не так много шансов. В главе 11 мы говорили о том, как эффекты крошечных квантовых флуктуаций могут быть видны на ясном ночном небе, поскольку они были грандиозно растянуты в ходе космического расширения, что привело к образованию сгущений материи, давших начало звёздам и галактикам. (Вспомним аналогию с мелкими каракулями на оболочке воздушного шара, которые растягиваются, когда этот шар надувают.) Это яркий пример того, как можно получить доступ к квантовой физике через астрономические наблюдения. Возможно, это ещё не предел. Не исключено, что космическое расширение может растягивать отпечатки ещё более мелкомасштабных процессов или характеристик — физики струн, или вообще квантовой гравитации, или ультрамикроскопической атомизированной структуры пространства-времени — и распространять их влияние по небесам неким тонким, но наблюдаемым образом. Возможно, Вселенная уже растянула микроскопические нити ткани космоса и распустила их по небу, так что всё, что нам нужно, — это научиться их увидеть.

Чтобы добраться до проверки самых последних идей, касающихся фундаментальных физических законов, вполне может потребоваться и чрезвычайная мощь ускорителей частиц, способных воссоздать экстремальные условия, невиданные с момента Большого взрыва. Но, по моему мнению, нет ничего более поэтичного, результата более изысканного, объединения более полного, чем получить подтверждение наших теорий об ультрамалом — теорий об ультрамикроскопическом

строении пространства, времени и материи, — обратив к небу самые мощные телескопы и молчаливо всматриваясь в звёзды.

Словарь научных терминов

Абсолютизм. Система взглядов, в которой пространство считается абсолютным.

Абсолютное пространство. Ньютоновская концепция пространства; пространство считается неизменным, универсальным и не зависящим от того, что в нём содержится.

Абсолютное пространство-время. Взгляд на пространство и время с точки зрения специальной теории относительности; пространство-время в своей целостности (но не по отдельности) считается неизменным, универсальным и не зависящим от того, что в нём содержится.

Большое сжатие. Возможный конец Вселенной, напоминающий *Большой взрыв*, протекающий в обратном направлении, когда пространство коллапсирует в себя.

Вакуум. Настолько пустая область пространства, насколько это возможно; состояние с самой низкой энергией.

Вектор скорости. Величина скорости и направление движения объекта.

Великое объединение. Теория, объединяющая сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия в рамках единого формализма.

Волна вероятности. Волна в квантовой механике, которая может кодировать вероятность обнаружения частицы в заданной точке пространства.

Волновая функция. См. *Волна вероятности*.

Вращательная инвариантность, вращательная симметрия. Независимость от вращения характеристик физической системы или теоретического закона.

Временной слой, срез по времени. Всё пространство в заданный момент времени; отдельное сечение блока пространства-времени.

Второе начало термодинамики. Закон, гласящий, что в среднем энтропия физической системы имеет тенденцию возрастать, начиная с любого заданного момента времени.

Глюоны. Частицы, передающие сильное взаимодействие.

Горизонт событий. Воображаемая сфера, окружающая чёрную дыру; после пересечения этой сферы обратного пути нет; всё, что пересекло горизонт событий, не может вырваться из гравитационного поля чёрной дыры.

Гравитоны. Гипотетические частицы, передающие гравитационное взаимодействие.

Замкнутые струны. Нити энергии (струны) теории струн в виде петель.

Запутанность, квантовая запутанность. Квантовое явление, при котором коррелируют свойства разнесённых в пространстве частиц.

Инерция. Свойство объектов сопротивляться своему разгону или замедлению.

Интерференция. Явление наложения волн, при котором происходит их взаимное усиление в одних точках пространства и ослабление — в других. В квантовой механике позволяет комбинироваться альтернативам, которые выглядят исключаящими друг друга.

Инфлатон, поле инфлатона. Поле, энергия и отрицательное давление которого вызывают инфляционное расширение.

Инфляционная космология. Космологическая теория, включающая в себя краткий период раннего этапа развития Вселенной, когда та испытала колоссальное расширение с огромной скоростью.

Информация о выборе пути. Квантово-механическая информация, определяющая путь, выбранный частицей при движении от источника к детектору.

Квантовая механика. Теория, разработанная в 20–30-х гг. XX в. для описания области атомных и субатомных частиц.

Квантовая хромодинамика. Релятивистская квантовая теория поля, описывающая сильное взаимодействие.

Квантовые флуктуации. Неизбежные быстрые изменения силового поля на микроскопических масштабах, возникающие благодаря принципу неопределённости в квантовой физике.

Кварки. Частицы материи, участвующие в сильных взаимодействиях. Существует шесть разновидностей кварков (u, d, c, s, t, b).

Классическая физика. В данной книге под классической физикой понимаются физические законы, введённые Ньютоном и Максвеллом. Термин «классическая физика» может пониматься и в более широком смысле и охватывать все неквантовые законы физики, включая уравнения специальной и общей теории относительности.

Критическая плотность. Величина средней плотности массы или энергии во Вселенной, которая требуется для того, чтобы пространство было плоским; равна приблизительно 10^{-23} г/см³.

Коллапс волны вероятности, коллапс волновой функции. Гипотетический процесс, в ходе которого волна вероятности (волновая

функция) мгновенно «схлопывается», переходя от формы, распределённой в пространстве, к острому пику.

Копенгагенская интерпретация. Толкование квантовой механики, в котором макроскопические объекты считаются подчиняющимися законам *классической физики*, а микроскопические объекты — законам квантовой физики.

Космическое микроволновое фоновое излучение, реликтовое излучение. Остаточное электромагнитное излучение (фотоны), сохранившееся с начальных этапов существования Вселенной и заполняющее всё пространство.

Космический горизонт, горизонт. Предельная удалённость точек в пространстве, откуда свет мог бы успеть дойти до нас с момента рождения Вселенной. Информация о более удалённых точках пространства нам недоступна.

Космологическая постоянная. Гипотетическая энергия и давление, однородно распределённые в пространстве. Происхождение и состав неизвестны.

Космология. Учение о рождении и эволюции Вселенной.

Микроволновое фоновое излучение. См. *Космическое микроволновое фоновое излучение*.

Многомировая интерпретация. Интерпретация квантовой механики, согласно которой все возможности, отражаемые волной вероятности, реализуются в «параллельных Вселенных».

Наблюдаемая Вселенная. Часть Вселенной в пределах нашего космического горизонта; часть Вселенной, находящаяся достаточно близко к нам, так что испущенный ею свет уже мог достичь нас; часть Вселенной, которую мы можем видеть.

Независимость от фона. Свойство физической теории, в которой пространство и время возникают из более фундаментальной концепции, а не вводятся аксиоматически.

Общая теория относительности. Эйнштейновская формулировка теории гравитации, в которой пространство-время передаёт гравитационное взаимодействие за счёт своей кривизны.

Объединённая теория. Теория, описывающая все взаимодействия и всю материю в рамках единого формализма.

Океан Хиггса. В данной книге под океаном Хиггса понимается средняя величина поля Хиггса в вакууме.

Открытые струны. Нити энергии (струны) в теории струн в виде отрезков с незамкнутыми концами.

Отрицательная кривизна. Вселенная, средняя плотность которой ниже критической, имеет отрицательную кривизну пространства; имеет седловидную форму.

Планковская длина. Составляет около 10^{-33} см. Порог длины, ниже которого возникает конфликт квантовой механики и общей теории относительности; размер, ниже которого рушатся обычные представления о пространстве.

Планковская масса. Приблизительно 10^{-5} г (примерно масса небольшой пылинки), что в десять миллиардов миллиардов раз больше массы протона. Характерная масса колеблющейся струны в теории струн.

Планковское время. Время (порядка 10^{-43} с), за которое свет проходит расстояние, равное планковской длине. Интервал времени, ниже которого рушится обычное представление о времени.

Плоское пространство. Возможная форма пространства Вселенной, имеющей нулевую кривизну.

Поле. «Нечто», пронизывающее пространство и служащее для передачи силы или описания присутствия/движения частиц. С математической точки зрения каждой точке пространства приписывается число или набор чисел, определяющих значение поля.

Поле Хиггса. См. *Электрослабое поле Хиггса*.

Потенциальная энергия. Энергия, запасённая в поле или объекте.

Принцип Маха. Утверждение, согласно которому всякое движение относительно, а состояние покоя определяется всеми остальными объектами во Вселенной.

Принцип неопределённости. Закон квантовой механики, устанавливающий фундаментальное ограничение на точность одновременного определения или измерения ряда взаимно дополнительных физических величин.

Проблема горизонта. Космологический парадокс, связанный с тем, что области пространства Вселенной, разделённые собственным горизонтом событий, имеют почти одинаковые свойства.

Проблема квантового измерения. Проблема, заключающаяся в том, чтобы объяснить, как из мириад возможностей, закодированных в волне вероятности, в процессе измерения получается единственный результат.

Проблема плоского пространства. Чем объяснить, что наблюдаемое пространство является плоским?

Пространство-время. Объединение пространства и времени, впервые сформулированное в специальной теории относительности.

Реляционизм. Система взглядов, в которой всякое движение относительно и пространство не абсолютно.

Светоносный эфир. См. *Эфир*.

Сила Казимира. Сила, имеющая квантово-механическую природу и возникающая из-за дисбаланса квантовых флуктуаций в вакууме.

Сильное взаимодействие. Самое сильное из четырёх видов взаимодействия, удерживает кварки внутри протонов и нейтронов (и протоны и нейтроны внутри атомных ядер).

Симметрия. Преобразование, при котором физическая система не меняется (например, сфера не меняется при вращении относительно своего центра); преобразование физической системы, не влияющее на законы, описывающие эту систему.

Симметрия относительно обращения времени. Неизменность принятых законов относительно направления течения времени. С любого заданного момента времени такие законы трактуют прошлое и будущее совершенно одинаковым образом.

Слабое взаимодействие. Сила, действующая на субатомных масштабах и ответственная за явления, подобные радиоактивному распаду.

Специальная теория относительности. Теория Эйнштейна, в которой пространство и время не являются по отдельности абсолютными, а зависят от относительного движения наблюдателей.

Спин. Квантово-механическое свойство элементарных частиц, приписываемое им, подобно волчку, вращательное движение (собственный момент вращения).

Спонтанное нарушение симметрии. Технический термин, обозначающий образование океана Хиггса; процесс, в ходе которого была скрыта или нарушена начальная симметрия.

Средняя величина поля Хиггса в вакууме. Ситуация, в которой средняя величина поля Хиггса в вакууме отлична от нуля; *океан Хиггса*.

Стандартные свечи. Космические объекты с известной светимостью, используемые для вычисления астрономических расстояний.

Стандартная модель. Квантово-механическая теория, включающая квантовую хромодинамику и теорию электрослабых взаимодействий; описывает всю материю и силы, за исключением гравитации. Основывается на концепции точечных частиц.

Стрела времени. Направление течения времени из прошлого в будущее.

Суперсимметрия. Симметрия, в которой законы физики не меняются при замене частиц с целым спином (частиц, передающих взаимодействие)

на частицы с полуцелым спином (частицы материи).

Сценарий мира на бране. Возможность, допускаемая теорией струн / М-теорией и состоящая в том, что три привычных нам пространственных измерения являются 3-браной.

Тёмная энергия. Гипотетические энергии и давление, равномерно заполняющие всё пространство. Является более общей концепцией, чем *космологическая постоянная*, поскольку энергия/давление этой субстанции может меняться со временем.

Тёмная материя. Материя, заполняющая пространство, которая подвержена гравитационному взаимодействию, но не излучает свет (и поэтому не видима для нас).

Теория большого взрыва, стандартная теория большого взрыва. Теория, описывающая горячую расширяющуюся Вселенную сразу после своего рождения.

Теория Калуцы-Клейна. Теория Вселенной с более чем тремя пространственными измерениями.

Теория струн. Теория, основывающаяся на колеблющихся нитях энергии (см. *Теория суперструн*), но необязательно включающая суперсимметрию. Иногда так для краткости называют теорию суперструн.

Теория суперструн. Теория, в которой фундаментальными объектами считаются одномерные петли (замкнутые струны) или отрезки (открытые струны) вибрирующей энергии. В этой теории исчезает конфликт квантовой механики и общей теории относительности на масштабах планковской длины. Теория суперструн включает суперсимметрию.

Теория электрослабых взаимодействий. Теория, описывающая *электромагнитные взаимодействия* и *слабые взаимодействия* в рамках единого формализма.

Трансляционная инвариантность, трансляционная симметрия. Неизменность принятых законов относительно места пространства, в котором они применяются.

Ускорение. Изменение величины скорости и/или направления движения.

Ускоритель, ускоритель частиц. Установка для изучения элементарных частиц, в которой эти частицы разгоняются до высоких скоростей и сталкиваются друг с другом.

Фазовый переход. Качественное изменение состояния физической системы, когда её температура меняется достаточно сильно.

Флуктуации вакуумного поля. См. *Квантовые флуктуации*.

Фотон. Частица — переносчик *электромагнитного взаимодействия*;

«сгусток» света.

Частица — переносчик взаимодействия. Наименьший «сгусток» или «пакет» силового поля, переносящий взаимодействие, квант поля взаимодействия.

Частицы Хиггса. Мельчайшие квантовые составляющие поля Хиггса.

Чаша потенциальной энергии. Форма, описывающая зависимость энергии поля от его величины; технически называется также потенциальной энергией поля.

Чёрная дыра. Объект, гравитационное поле которого настолько сильно, что способно захватывать всё, что подходит достаточно близко к нему (ближе *горизонта событий* чёрной дыры), даже свет.

Шкала Кельвина. Шкала температур, в которой отсчёт начинается с абсолютного нуля (минимально возможной температуры, составляющей -273° по шкале Цельсия).

Электромагнитная сила. Один из четырёх видов взаимодействия; действует на частицы, имеющие электрический заряд.

Электромагнитное поле. Поле электромагнитной силы.

Электронное поле. Поле, по отношению к которому электрон является наименьшей порцией или составной частью.

Электрослабое поле Хиггса. Поле, средняя величина которого отлична от нуля в холодном пустом пространстве; придаёт массу всем фундаментальным частицам (в электрослабой теории).

Энергетическая чаша. См. *Чаша потенциальной энергии*.

Энтропия. Мера беспорядка в физической системе; число перегруппировок компонентов системы, не приводящих к изменению её общего вида.

Эфир, светonosный эфир. Гипотетическая субстанция, заполняющая эфир и служащая средой для распространения света; эта концепция отвергнута в настоящее время.

D-браны, p-браны Дирихле. p-браны, которые являются «клейкими»: к ним прикрепляются концы открытых струн.

М-теория. Незавершённая в настоящее время теория, объединяющая все пять теорий струн в рамках одного формализма; полностью квантово-механическая теория всех сил и всех видов материи.

p-брана. Объект теории струн / М-теории, имеющий p пространственных измерений. См. также *D-браны, p-браны Дирихле*.

W- и Z-частицы. Частицы — переносчики слабого взаимодействия.

Литература для дальнейшего чтения

Популярная и специальная литература по проблеме пространства и времени огромна. Большинство приводимых ниже ссылок представляют популярную литературу, но некоторые требуют более глубокой подготовки. Эти книги оказались полезными лично для меня и являются хорошим началом для читателей, которые захотят лучше разобраться в вопросах, которые рассматриваются в этой книге.

Albert D. *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1994.

Albert D. *Time and Chance*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2000.

Alexander H. G. *The Leibniz-Clarke Correspondence*. Manchester, Eng.: Manchester University Press, 1956.

Barbour J. *The End of Time*. Oxford: Oxford University Press, 2000.

Barbour J., and Pfister H. *Mach's Principle*. Boston: Birkhauser, 1995.

Barrow J. *The Book of Nothing*. New York: Pantheon, 2000.

Bartusiak M. *Einstein's Unfinished Symphony*. Washington, D. C.: Joseph Henry Press, 2000.

Bell J. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1993.

Blanchard Ph., Giulini D., Joos E., Kiefer C., Stamatescu I.-O. *Decoherence: Theoretical, Experimental and Conceptual Problems*. Berlin: Springer, 2000.

Callender C., and Hugget N. *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 2001.

Cole K. C. *The Hole in the Universe*. New York: Harcourt, 2001.

Crease R., and Mann C. *The Second Creation*. New Brunswick, N. J.: Rutgers University Press, 1996.

Davies P. *About Time*. New York: Simon & Schuster, 1995.

Davies P. *How to Build a Time Machine*. New York: Allen Lane, 2001.

Davies P. *Space and Time in the Modern Universe*. Cambridge, Eng.: Cambridge University-Press, 1977.

D'Espagnat B. *Veiled Reality*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.

Deutsch D. *The Fabric of Reality*. New York: Allen Lane, 1997.

Ferris T. *Coming of Age in the Milky Way*. New York: Anchor, 1989.

- Ferris T. *The Whole Shebang*. New York: Simon & Schuster, 1997.
- Feynman R. *QED*. Princeton: Princeton University Press, 1985.
- Folsing A. *Albert Einstein*. New York: Viking, 1997.
- Gell-Mann M. *The Quark and the Jaguar*. New York: W. H. Freeman, 1994.
- Gleick J. *Isaac Newton*. New York: Pantheon, 2003.
- Gott J. R. *Time Travel in Einstein's Universe*. Boston: Houghton Mifflin, 2001.
- Guth A. *The Inflationary Universe*. Reading, Mass.: Perseus, 1997.
- Greene B. *The Elegant Universe*. New York: Vintage, 2000.
- Gribbin J. *Schrödinger's Kittens and the Search for Reality*. Boston: Little, Brown, 1995.
- Hall A. R. *Isaac Newton*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1992.
- Halliwell J. J., Perez-Mercader J., and Zurek W. H. *Physical Origins of Time Asymmetry*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1994.
- Hawking S. *The Universe in a Nutshell*. New York: Bantam, 2001.
- Hawking S., and Penrose R. *The Nature of Space and Time*. Princeton: Princeton University Press, 1996.
- Hawking S., Thorne K., Novikov I., Ferris T., and Lightman A. *The Future of Spacetime*. New York: Norton, 2002.
- Jammer M. *Concepts of Space*. New York: Dover, 1993.
- Johnson G. *A Shortcut Through Time*. New York: Knopf, 2003.
- Kaku M. *Hyperspace*. New York: Oxford University Press, 1994.
- Kirschner R. *The Extravagant Universe*. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- Krauss L. *Quintessence*. New York: Perseus, 2000.
- Lindley D. *Boltzmann's Atom*. New York: Free Press, 2001.
- Lindley D. *Where Does the Weirdness Go?* New York: Basic Books, 1996.
- Mach E. *The Science of Mechanics*. La Salle, Ill.: Open Court, 1989.
- Maudlin T. *Quantum Non-locality and Relativity*. Maiden, Mass.: Blackwell, 2002.
- Mermin N. D. *Boojums All the Way Through*. New York: Cambridge University Press, 1990.
- Overbye D. *Lonely Hearts of the Cosmos*. New York: HarperCollins, 1991.
- Pais A. *Subtle Is the Lord*. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- Penrose R. *The Emperor's New Mind*. New York: Oxford University Press, 1989.
- Price H. *Time's Arrow and Archimedes' Point*. New York: Oxford University Press, 1996.

- Rees M. *Before the Beginning*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1997.
- Rees M. *Just Six Numbers*. New York: Basic Books, 2001.
- Reichenbach H. *The Direction of Time*. Mineola, N. Y.: Dover, 1956.
- Reichenbach H. *The Philosophy of Space and Time*. New York: Dover, 1958.
- Savitt S. *Time's Arrows Today*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 2000.
- Schrödinger E. *What Is Life?* Cambridge, Eng.: Canto, 2000.
- Siegfried T. *The Bit and the Pendulum*. New York: John Wiley, 2000.
- Sklar L. *Space, Time, and Spacetime*. Berkeley: University of California Press, 1977.
- Smolin L. *Three Roads to Quantum Gravity*. New York: Basic Books, 2001.
- Stenger V. *Timeless Reality*. Amherst, N. Y.: Prometheus Books, 2000.
- Thorne K. *Black Holes and Time Warps*. New York: W. W. Norton, 1994.
- Weinberg S. *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon, 1992.
- Weinberg S. *The First Three Minutes*. New York: Basic Books, 1993.
- Weizsacker C. F. von. *The Unity of Nature*. New York: Farrar, Straus, and Giroux, 1980.
- Wilczek F., and Devine B. *Longing for the Harmonies*. New York: Norton, 1988.
- Zeh H. D. *The Physical Basis of the Direction of Time*. Berlin: Springer, 2001.

Литература для дальнейшего чтения — русские переводы

- Вайнберг С. Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. М.: URSS, 2008.
- Вайнберг С. Первые три минуты: Современный взгляд на происхождение Вселенной. М.: Энергоиздат, 1981.
- Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории / Пер. с англ.; Общ. ред. В. О. Малышенко. М.: URSS, 2008.
- Девис П. Пространство и время в современной картине Вселенной. М.: Мир, 1979.
- Дойч Д. Структура реальности. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
- Мах Э. Механика. Историко-критический очерк её развития. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.

Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989.

Пенроуз Р. Новый ум короля. М.: URSS, 2008.

Рейхенбах Г. Направление времени. М.: URSS, 2003.

Рейхенбах Г. Философия пространства и времени. М.: URSS, 2009.

Тейлор Э. Ф., Уилер Дж. А. Физика пространства-времени / Пер. с англ. Н. В. Мицкевича. Изд. 2-е, дополненное. М.: Мир, 1971.

Торн К. С. Чёрные дыры и складки времени. Дерзкое наследие Эйнштейна. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2007.

Хокинг С. Мир в ореховой скорлупке. СПб.: Амфора, 2007.

Хокинг С., Пенроуз Р. Природа пространства и времени. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.

Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества. М.: Наука, 1988.

Шрёдингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. М.: Атомиздат, 1972.

Литература для дальнейшего чтения, добавленная при переводе

В следующих статье и книге можно найти очень интересное и полезное сопоставление программ теории суперструн и петлевой квантовой гравитации:

Smolin L. *How far are we from the quantum theory of gravity?* // arXiv:hep-th/0303185

Пенроуз Р. Путь к реальности или законы, управляющие Вселенной. Полный путеводитель. Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007.

Фундаментальные вопросы квантовой механики и квантовой теории измерений (включая роль наблюдателя, неравенства Белла, телепортацию и др.) достаточно популярно, но технически точно и на высоком педагогическом уровне рассмотрены в книге:

Менский М. Б. Человек и квантовый мир. Странности квантового мира и тайна сознания. Фрязино: Век-2, 2007.

Примечания

Тинейджер Барт Симпсон — персонаж мультипликационного сериала о семейке Симпсонов. В сериале высмеиваются стереотипы «среднестатистического американца». (*Прим. перев.*)

Для описания вращательного движения иногда используют понятия *центробежной* и *центростремительной* силы. Но это всего лишь термины, а мы хотим понять, почему вращательное движение вызывает силу.

Гомер Симпсон — ещё один персонаж мультсериала о семейке Симпсонов, отец ранее упомянутого Барта. Гомер назван здесь «бесстрашным астронавтом» с большой дозой иронии — в «мультипликационной жизни» он совсем не такой. (*Прим. перев.*)

Мы стараемся давать цитаты из Исаака Ньютона в классическом переводе А. Н. Крылова, что, однако, не всегда возможно. Проблема в том, что А. Н. Крылов переводил третье издание «Начал», а Б. Грин пользовался первым или вторым. Тексты разных изданий отличаются довольно сильно. В случае невозможности использования перевода А. Н. Крылова перевод будет даваться с английского оригинала книги Б. Грина. Перевод А. Н. Крылова будет приводиться по изданию: *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии / Пер. с лат. и комментарии А. Н. Крылова; Предисловие Л. С. Поллака. М.: URSS, 2008. (*Прим. ред.*)

Ньютон И. Математические начала натуральной философии. С. 30.
(Прим. ред.)

Ньютон И. Математические начала натуральной философии. С. 36.
(Прим. ред.)

Существуют разногласия относительно точного взгляда Маха на нижеследующее. Некоторые из его работ несколько неоднозначны, и некоторые из идей, приписываемых ему, возникли из последующей интерпретации его работ. Поскольку, по-видимому, он был осведомлён об этих интерпретациях и никогда не корректировал их, то некоторые учёные-историки полагают, что он был согласен с их выводами. Но ради исторической точности следует везде, где я пишу «Мах утверждает» или «идеи Маха», читать «преобладающая интерпретация подхода, предложенного Махом».

Мне нравятся примеры, связанные с человеком, поскольку они дают непосредственную связь между физикой и внутренними ощущениями, но изъясн таких примеров связан с нашей способностью по своей воле двигать одной частью тела по отношению к другой — в сущности, использовать одну часть тела в качестве системы отсчёта для определения движения другой части (например, вращение рук по отношению к голове). И чтобы исключить не относящиеся к делу возможности, я сделал акцент на *однородном* вращательном движении, в котором все части тела вращаются вместе. Так что, когда я говорю о вращении тела, представляйте его себе как вращение двух камней, связанных верёвкой, или как вращение фигуриста на Олимпийских играх, когда каждая часть тела вращается с той же угловой скоростью, как и любая другая.

Дреды — традиционная причёска ямайских растафари (современные последователи растафари известны как растаманы). Волосы спутываются во множество прядей, которые не расчёсываются. (*Прим. перев.*)

Ньютон И. Математические начала натуральной философии. С. 30.
(Прим. ред.)

Понсе де Леон (1460?–1521) — испанский конкистадор, участник второй экспедиции Христофора Колумба. Был одержим идеей поиска «источника молодости». *(Прим. перев.)*

Дата приведена неверно. Речь идёт об экспериментах Миллера, которые были проведены с 8 по 21 апреля 1921 г. См.: *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989. С. 110. (*Прим. ред.*)

Эксперименты по проверке постоянства скорости света и сейчас продолжаются со всё возрастающей точностью. Они имеют большое значение для проверки теорий квантовой гравитации, так как некоторые из таких теорий предсказывают слабое нарушение постоянства скорости света (и нарушают некоторые другие следствия СТО). (*Прим. ред.*)

Спрингфилд — вымышленный город, в котором разворачивается действие знаменитого мультсериала про семейку Симпсонов. Далее будут частенько встречаться достопримечательности Спрингфилда — супермаркет «На скорую руку» и атомная электростанция. Мардж — мать семейки Симпсонов, Лиза — её дочь. Глава семейства Гомер работает на той самой атомной электростанции. (*Прим. перев.*)

Шоу «Щекотка и Царапка» смотрит всё та же семейка Симпсонов.
(Прим. перев.)

Как и в любой книжке с бегущими картинками, на страницах рис. 3.3 отражаются только характерные моменты времени. Глядя на них, у вас может возникнуть интересный вопрос, является ли время дискретным или оно бесконечно делимо. Мы ещё вернёмся к этому вопросу, а пока представим, что время бесконечно делимо, так что в нашей книжке с бегущими картинками бесконечное число страниц.

Апу и Мартин — ещё парочка персонажей из мультсериала про семейку Симпсонов. (*Прим. перев.*)

В классическом переводе «Начал» Ньютона на русский язык А. Н. Крыловым эта фраза отсутствует. Согласно переводу Крылова, Ньютон пишет о природе тяготения следующее (с. 661–662): «До сих пор я изъяснял небесные явления и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я не указывал причины самого тяготения. <...> Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю. Всё же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезою, гипотезам же метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам, не место в экспериментальной философии». (Прим. ред.)

Барни Гамбл — ещё один персонаж мультсериала про семейку Симпсонов. Проживает также в Спрингфилде. *(Прим. перев.)*

Vomit Comet — неперево́димая игра слов. Vomit — рвота, comet — комета. (*Прим. ред.*)

Легче представить искривление пространства, но время, из-за тесной связи с пространством, также искривляется материей и энергией. И подобно тому как искривление пространства означает сжатие или растяжение пространства (как на рис. 3.10), точно также искривление времени означает сжатие или растяжение времени. Таким образом, часы, испытывающие разное гравитационное притяжение (например, одни часы — на Солнце, а другие — в глубоком пустом космосе), отсчитывают время по-разному. В действительности оказывается, что искривление пространства, вызываемое обычными космическими объектами наподобие Земли и Солнца (в отличие от чёрных дыр), гораздо менее выражено, чем вызываемое ими искривление времени. [{220}](#)

Ситуация не столь проста. Константа c (скорость света) в действительности входит в уравнение Эйнштейна двумя разными способами. В левой части уравнения она связана с геометрией пространства-времени и не имеет прямого отношения к электромагнетизму, в правой части уравнения связана с полями материи и, в частности, с электромагнитным полем. Заранее не очевидно, что это одна и та же постоянная, что позволяет отдельно говорить о скорости распространения гравитации c_g . Проверка того, что $c_g = c$, потребовала проведения специальных наблюдений, интерпретация которых оказалась не совсем простой. См. по этому поводу: Kopeikin S. M. *The Speed of Gravity in General Relativity and Theoretical Interpretation of the Jovian Deflection Experiment*. Class. Quant. Grav. 2004. № 21. P. 3251–3286 (arXiv:gr-qc/0310059). (Прим. ред.)

В специальной теории относительности — особом случае общей теории относительности, когда гравитационное поле равно нулю, — это суждение остаётся справедливым; нулевое гравитационное поле всё ещё является полем, которое может быть измерено и может измениться, а потому оно предоставляет нечто, по отношению к чему может быть определено ускорение.

Агенты Скалли и Малдер — персонажи популярного сериала «Секретные материалы» («X-files»). *(Прим. перев.)*

Старая английская загадка-парадокс: «Если в лесу падает дерево и нет никого, кто мог бы это услышать, то издаёт ли оно грохот?» (*Прим. ред.*)

В дзен-буддизме коан — это вопрос-притча, не имеющий рационального ответа, но доступный интуитивному пониманию. Далее автор ссылается на один из самых известных коанов: «Все знают хлопок двух ладоней. А как звучит хлопок одной ладони?» (*Прим. перев.*)

Фландерсы — ещё одна семейка из сериала про Симпсонов. Нед — отец семейства, а Тод и Род — его сыновья. *(Прим. перев.)*

Полный вывод неравенств Белла и обсуждение соответствующих экспериментов можно найти в статьях: *Спасский Б. И., Московский А. В.* О нелокальности в квантовой физике // УФН. 1984. Т. 142. С. 599; *Гриб А. А.* Неравенства Белла и экспериментальная проверка квантовых корреляций на макроскопических расстояниях // Там же. С. 619. Технически точное, но достаточно популярное обсуждение неравенств Белла (как и многих других принципиальных вопросов квантовой механики) можно найти также в книге: *Менский М. Б.* Человек и квантовый мир. Фрязино: Век-2, 2007. (Прим. ред.)

Ради простоты изложения я нарисовал схему, в которой спины электронов точно коррелированы, однако общепринятой является схема, в которой спины электронов точно антикоррелированы, так что показания детекторов всегда противоположны друг другу. Чтобы согласовать эти два подхода, можете представить, что на одном из детекторов я поменял метки, указывающие на направления спина.

Многие исследователи, включая меня, считают, что довод Белла и эксперимент Аспекта убедительно устанавливают, что наблюдаемые корреляции между далеко разнесёнными частицами не могут быть объяснены рассуждениями в стиле Скалли — что корреляции закладываются каким-то обычным способом, во время, когда частицы были (ранее) вместе. Другие пытаются уклониться от ошеломляющего заключения о нелокальности, к которому это ведёт, или ослабить это заключение. Я не разделяю их скептицизм, но отдельные работы для широкого круга читателей, в которых обсуждаются некоторые из таких альтернатив, цитируются в примечании [{221}](#).

Отражение фотонов от зеркал, преломление призмами и другими элементами оптики не препятствует наблюдению запутанности фотонов, что часто и используется в экспериментах. Важным является то, чтобы фотон, провзаимодействовав с элементом оборудования, не оставил там никаких «следов»: возбуждённых атомов, перевёрнутых спинов электронов и т. д. (*Прим. ред.*)

Поттер Стюарт — член Верховного суда США. Известен своим «определением», что такое жёсткая порнография: «Я знаю это, когда вижу это». (*Прим. ред.*)

Джон Уилкс Бут (John Wilkes Booth) убил президента Линкольна в театре Форда в 1865 г. (*Прим. ред.*)

Отметим любую точку в блоке пространства-времени. Отрежем ломтик, который включает эту точку и пересекает наш текущий ломтик настоящего под углом менее 45° . Этот ломтик будет представлять ломтик настоящего — *реальность* — удалённого наблюдателя, который был сначала в покое относительно нас, как Чуви, а теперь движется относительно нас со скоростью, меньшей скорости света. По построению этот ломтик включает (произвольную) точку в буханке, которую мы отметили. [{222}](#)

К этому утверждению существует исключение, связанное с определённым классом экзотических частиц. Поскольку это относится к обсуждаемым в этой главе вопросам, я должен отметить, что рассматриваю это обстоятельство как не имеющее существенного значения и более не буду этого касаться. Если вы заинтересованы, короткое обсуждение этого вопроса можно найти в примечании 2.

Отметим, что симметрия по отношению к обращению времени не означает, что само время разворачивается или «бежит» назад. Вместо этого указанная симметрия заключается в способности событий, происходящих во времени в одном временном порядке, происходить также и в обратном порядке. Более подходящим термином может быть симметрия по отношению к обращению событий, или обращению процессов, или обращению порядка событий, но мы будем придерживаться стандартно используемого термина.

Энтропия — это ещё один пример, в котором терминология усложняет идеи. Не расстраивайтесь, если вам опять пришлось напомнить себе, что *низкая* энтропия означает *высокий* порядок, а *высокая* энтропия означает *низкий* порядок (эквивалентный высокому беспорядку). Мне часто приходилось так делать.

Оливер Стоун — американский кинорежиссёр, сценарист и продюсер известных исторических художественных и документальных фильмов («Александр» и др.). *(Прим. ред.)*

Вспомним, что в разделе «Энтропия» мы показали огромное различие между числом упорядоченных и разупорядоченных конфигураций для всего лишь 693 двусторонних листков бумаги. Теперь мы обсуждаем поведение около 10^{24} молекул H_2O , так что различие между числом упорядоченных и разупорядоченных конфигураций будет настолько грандиозным, что захватывает дух. Более того, те же самые рассуждения остаются в силе для всех других атомов и молекул внутри вас и в окружении (мозг, камеры наблюдения, молекулы воздуха и т. д.). То есть в стандартном объяснении, в котором вы можете верить своей памяти, не только частично растаявшие кубики льда были в 10:00 вечера в более упорядоченном — менее вероятном — состоянии, но и всё остальное: когда видеокамера записывает последовательность событий, это проявляется в общем росте энтропии (из-за нагревания и сопутствующих процессу записи помех); аналогично, хотя мы слабо понимаем микроскопические детали процесса записи информации мозгом, но ясно, что когда мозг записывает события, тоже имеется итоговый рост энтропии (мозг может увеличивать порядок, но, как и с любыми производящими порядок процессами, если мы примем во внимание выделение тепла, будет итоговый рост энтропии). Если мы сравниваем полную энтропию бара между 10:00 и 10:30 вечера в двух сценариях — один, в котором вы верите своей памяти, а другой, в котором вещи спонтанно упорядочиваются из начального неупорядоченного состояния, достигая соответствия с тем, что вы видите сейчас, в 10:30 вечера, — то получим чудовищную разницу энтропий. Последний сценарий (вариант 2) на каждом его этапе имеет бо́льшую энтропию, чем первый сценарий. С точки зрения вероятности последний сценарий значительно более вероятен.

Тесно связанная с этим особенность заключается в следующем: если мы убедили себя в том, что мир, который мы видим прямо сейчас, только что собрался из полного беспорядка, то точно такие же рассуждения, но привлекаемые в более поздний момент времени, потребуют отказаться от наших текущих убеждений и, напротив, объяснить упорядоченный мир более ранней флуктуацией. Так что на этом пути размышлений каждый следующий момент сводит на нет убеждения, содержащиеся в каждом предыдущем моменте, — определённо малоубедительный способ объяснения космоса.

Это значит, что чёрная дыра заданного размера содержит больше энтропии, чем что-либо другое того же размера.

В русскоязычной литературе чаще употребляется термин «суммирование по путям» или «интегрирование по путям» (или, в более общем случае, когда речь идёт не об отдельных частицах, а о квантованных полях, метод называется *континуальным интегрированием*). (Прим. ред.)

Хотя может показаться, что фейнмановский подход через суммы по историям делает акцент на корпускулярной стороне дела, это просто специальная интерпретация вероятностной *волны* (поскольку она включает много историй отдельных частиц, каждая даёт свой собственный вероятностный вклад), так что такая интерпретация подключает волновую сторону как дополнительную. Когда мы говорим о чём-то, ведущем себя как частица, мы всегда имеем в виду обычную частицу, которая движется вдоль одной и только одной траектории.

В психологии есть даже специальный термин — ретроспективная аберрация памяти. (*Прим. ред.*)

Игра в бейсбол состоит из девяти периодов — иннингов, каждый иннинг завершается после трёх выбываний игроков (аутов). Детальное понимание правил игры не особенно существенно для дальнейшего. Суть примера заключается в том, что сделанная в прошлом ошибка иногда может быть исправлена последующими действиями. (*Прим. ред.*)

Если этот раздел окажется трудным, вы можете спокойно перейти к следующему разделу, последовательность изложения не потеряется. Но я призываю вас разобраться с ним, так как результаты в полном смысле слова изумительны.

Англоязычный термин *down-conversion* не имеет общепринятого русского перевода, и иногда переводится как *параметрическое преобразование частоты вниз* или *параметрическое рассеяние*, но последнее время всё чаще используется фонетическая калька *даун-конверсия*. Мы следуем последнему варианту. (Прим. ред.)

Левый путь — значит, соответствующий букве L на рис. 7.5б. На рисунке левая часть установки (L) изображена справа, а правая (R) — слева. (*Прим. ред.*)

Квантовая механика справедливо имеет репутацию описывать что угодно, но только не нечто гладкое и размеренное; скорее, как мы явно увидим в последующих главах, она выявляет турбулентный и дрожащий микрокосмос. Причиной этого дрожания является вероятностная природа волновой функции — даже если вещи могут иметь некоторый вид в один момент, имеется вероятность, что они будут существенно другими моментом позже, — и это не есть всегда существующие колебания самой волновой функции.

Сполдинг Грей — американский актёр. *(Прим. ред.)*

Помимо использованного в переводе термина *декогеренция*, в русскоязычной литературе используется также термин *декогерентизация*, но использованный в переводе термин *декогеренция* нам кажется более удачным (и он тоже используется в русскоязычной научной литературе), так как он ближе к оригиналу по звучанию, и, кроме того, термин должен по смыслу быть своеобразным антиподом интерференции, что и поддерживается таким словообразованием. (*Прим. ред.*)

Имеются сообщения о так называемых войдах — областях почти пустого пространства, не содержащего галактик, размером порядка миллиарда световых лет. Так что шкала однородности может оказаться выше сотен миллионов световых лет. (*Прим. ред.*)

И в этом вся суть. Реликтовый микроволновой фон снабжает Вселенную выделенной системой отсчёта — сопутствующей системой, — с которой и можно связать универсальные космологические часы. (*Прим. ред.*)

Выйти за пределы двумерной аналогии поверхности шара и иметь сферическую трёхмерную модель легко математически, но её трудно изобразить на картинке даже для профессиональных математиков и физиков. У вас может возникнуть искушение представить себе твёрдый трёхмерный шар, похожий на шар для боулинга, но без дырок для пальцев. Однако это неудовлетворительный образ. Мы хотим, чтобы все точки в модели рассматривались на одинаковом основании, поскольку мы верим, что каждое место во Вселенной (в среднем) в точности похоже на любое другое. Но шар для боулинга имеет несколько сортов отличающихся точек: некоторые находятся на внешней поверхности, некоторые находятся внутри, одна находится прямо в центре. Напротив, точно так же, как двумерная поверхность воздушного шара окружает трёхмерную сферическую область (содержащую воздух внутри шара), приемлемая сферическая трёхмерная форма должна окружать четырёхмерную сферическую область. Так что трёхмерная сферическая поверхность шара в четырёхмерном пространстве является приемлемой формой. Но если вы всё же хотите нащупать аналогию, делайте то же самое, что делают все профессионалы: пользуйтесь легко представимыми аналогиями более низкого порядка. Они содержат почти все важные особенности. Чуть дальше мы рассмотрим трёхмерное плоское пространство, в противоположность круглой форме сферы, и это плоское пространство можно представить.

В зависимости от того, ускоряется или замедляется темп расширения Вселенной со временем, свет, испущенный такой галактикой, может вступить в состязание, которое заставило бы Зенона Элейского гордиться: свет может лететь к нам со скоростью света, в то время как расширение пространства всё более увеличивает расстояние, которое свет ещё должен преодолеть, таким образом, свет вообще не сможет достигнуть нас. Подробнее см. в примечании [{223}](#).

Ядерные силы удерживают как целое атомные ядра, а атом как целое удерживается электромагнитными силами. (*Прим. ред.*)

Точно так же, как экран видеоигры даёт версию плоского пространства конечного размера, которое не имеет краёв или границ, имеются версии пространства седловидной формы конечного размера, которые также не имеют краёв или границ. Я больше не буду обсуждать это, запомним лишь, что все три возможные кривизны (положительная, нулевая и отрицательная) могут быть реализованы в формах конечного размера без краёв или границ (и тогда космический Магеллан в принципе смог бы осуществить космическую версию своего путешествия во Вселенной, кривизна которой задана любой из трёх возможностей).

Сегодня материи во Вселенной больше, чем излучения, так что критическую плотность удобно выражать в единицах, наиболее подходящих для измерения массы, — граммы на кубический метр. Отметим также, что хотя плотность 10^{-23} г на кубический метр может и не выглядит очень большой, в космосе *очень много* кубических метров пространства. Более того, оглядываясь назад во времени, вы увидите, что чем меньше пространство, по которому распределена материя/энергия, тем более плотной становится Вселенная.

Уже здесь имеет смысл подчеркнуть, что речь идёт об *известной* Вселенной (точнее, находящейся сейчас внутри нашего космологического горизонта). Отсюда вовсе не следует, что вообще *вся* Вселенная (включая её часть за пределами горизонта) тоже сожмётся до размеров точки. Более того, если Вселенная бесконечная и плоская сейчас, то она вполне могла быть бесконечной и плоской уже в момент Большого взрыва. Автор коснётся этих вопросов чуть ниже. (*Прим. ред.*)

Хотя уменьшение симметрии означает, что меньшее число преобразований проходят незамеченными, тепло, переданное окружающей среде во время такой трансформации, гарантирует, что полная энтропия — включая энтропию окружающей среды — всё же возрастает.

Терминология не особенно важна, но коротко укажем, откуда она происходит. Жёлоб на рис. 9.1в и г имеет симметричную форму (он круговой), в которой каждая точка эквивалентна любой другой (каждая точка жёлоба обозначает величину поля Хиггса с минимальной возможной энергией). Кроме того, когда величина поля Хиггса сползает на дно чаши, она располагается только в одной определённой точке жёлоба, таким образом, она «спонтанно» выбирает одно положение в жёлобе как специальное. Теперь все точки жёлоба не являются больше одинаково равноправными, поскольку одна выделена, так что поле Хиггса уничтожает или «нарушает» исходную симметрию между ними. Поэтому процесс, в котором поле Хиггса соскальзывает к одной частной ненулевой величине в жёлобе, называется спонтанным нарушением симметрии. Далее в тексте мы более детально опишем детали нарушения симметрии, связанные с формированием океана Хиггса. [{224}](#)

Large Hadron Collider, LHC (<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch>). Ускоритель рассчитан на изучение взаимодействия протонов при столкновении частиц во встречных пучках, по 7 ТэВ энергии на частицу в пучке. Может работать также с тяжёлыми ионами. Запуск коллайдера был осуществлён 10 сентября 2008 г., но из-за технических проблем выход на проектную мощность запланирован на лето 2009 г. (*Прим. ред.*)

«Остров Джиллигана» (Gilligan's Island) — известнейший американский комедийный сериал о потерпевших крушение на необитаемом острове. Впервые был показан по телевидению в 1964–1967 гг., и с тех пор его популярность ничуть не убывает, а, скорее, даже растёт. (Прим. ред.)

Секретариат — жеребец, победивший на скачках в 1973 г. в США. Выиграл все скачки «Тройной короны» для чистокровных лошадей — «Кентукки Дерби», «Прикнесс Стэйкс» и «Белмонт Стэйкс». (*Прим. ред.*)

Альтернативное объяснение тонкой подстройки может заключаться в так называемом антропном принципе, который утверждает, что Вселенная такова, какова она есть, просто потому, что если бы она была иной, нас бы не было. Если бы с самого начала плотность Вселенной не была точно равна критической, жизнь никогда не возникла бы. Инфляционная космология решает эту частную проблему тонкой настройки параметров, но не решает проблему тонкой настройки вообще, так как точное равенство плотности Вселенной критической плотности — далеко не единственный пример тонкой настройки параметров. Другим примером является спектр масс элементарных частиц — будь он немного иным, не смогли бы возникнуть тяжёлые химические элементы и жизнь вместе с ними. Есть и некоторые другие подобные совпадения. Их по-прежнему приходится объяснять в рамках антропного принципа. (*Прим. ред.*)

Скайрайтинг (от англ. skywriting) — хорошо известное на Западе средство распространения рекламы, представляющее собой короткое сообщение, написанное на небе самолётом при помощи дымовой струи, принимающей форму букв сообщения. (*Прим. ред.*)

По современным представлениям, первые звёзды сформировались раньше, чем оформились первые галактики. Такие звёзды называются звёздным населением III типа (см., например: Coppi P. S., Bromm V., Larson R. B. *Towards Population III: The Collapse and Fragmentation of Primordial Gas* // arXiv:astro-ph/0103382). (Прим. ред.)

Раньше, чем по измерениям, выполненным на спутнике COBE, анизотропия реликтового излучения была обнаружена по измерениям на борту советского спутника серии «Прогноз» в эксперименте под названием «Реликт» по руководством И. А. Струкова. В отличие от эксперимента на COBE измерения в эксперименте «Реликт» проводились только на одной частоте, поэтому обработка данных оказалась очень сложной. Первые положительные результаты об обнаружении анизотропии были доложены А. А. Брюхановым в январе 1992 г. на семинаре в Государственном астрономическом институте им. Штернберга (ГАИШ) и в это же время посланы статьи в научные журналы. Первое сообщение о результатах COBE было сделано Дж. Смутом в конце апреля 1992 г. В 2006 г. Дж. Смут за открытие анизотропии реликтового излучения получил Нобелевскую премию. *(Прим. ред.)*

Аналогия с резиновыми лентами хотя и полезна, но неточна. Направленное внутрь отрицательное давление, создаваемое резиновыми лентами, затрудняет расширение комнаты, тогда как отрицательное давление инфлатона заставляет расширяться пространство. Это важное различие иллюстрирует уточнение, подчёркнутое в разделе «Эйнштейн и отталкивающая гравитация» [аб. 9]: в космологии однородное отрицательное давление само по себе вовсе не вызывает расширение (к возникновению сил приводит только разность давлений, так что однородное давление, как положительное, так и отрицательное, сил не вызывает). Дело в том, что давление, подобно массе, вызывает гравитационную силу. А отрицательное давление вызывает отталкивающую гравитационную силу, которая ведёт к расширению пространства. Это не влияет на наши заключения.

Когда Вселенная расширяется, потеря энергии фотонами может непосредственно наблюдаться вследствие увеличения их длин волн (они подвергаются *красному смещению*), и чем больше длина волны фотона, тем меньшей энергией он обладает. Фотоны микроволнового фона подвергались такому красному смещению около 14 млрд лет, что объясняет их большие — микроволновые — длины волн и их низкую температуру. Аналогично, материя теряет свою кинетическую энергию (энергию движения частиц), но полная энергия, связанная в массе частиц (их *энергия покоя* — энергия, эквивалентная их массе, когда они покоятся), остаётся постоянной.

Некоторые исследователи, включая Алана Гута и Эдди Фархи, изучали, можно ли гипотетически создать новую Вселенную в лаборатории путём синтеза кусочка поля инфлатона. Абстрагируясь от факта, что мы всё ещё не имеем прямого экспериментального доказательства того, что существует такая вещь, как поле инфлатона, отметим, что десять килограммов поля инфлатона нужно было бы втиснуть в ничтожный объём пространства размером около 10^{-26} см, а потому плотность была бы гигантской — примерно в 10^{67} раз больше плотности атомных ядер, — а это находится за пределами того, что мы можем сделать сейчас или, вероятно, когда-либо.

Не надо путать: инфляционное растягивание квантовых флуктуаций, обсуждавшееся в предыдущем разделе, по-прежнему производит мелкие неизбежные неоднородности с частотой порядка 1 к 100 000. Но эта мелкая неоднородность накладывается поверх гладкой Вселенной. Возникновение именно этой гладкой и однородной Вселенной мы сейчас и описываем.

Для простоты изложения мы будем рассматривать только поля, которые достигают своей наименьшей энергии, когда их величина равна нулю. Обсуждение других полей — полей Хиггса — идентично, за исключением того, что поля колеблются вокруг ненулевой величины поля с минимальной энергией. Если вы хотите сказать, что область пространства пуста, только если там не присутствует материя и все поля *отсутствуют*, а не просто имеют величину нуль, смотрите примечание [{225}](#).

Остаток этой главы излагает открытие теории суперструн и обсуждает основные идеи теории относительно унификации структуры пространства-времени. Читавшие *«Элегантную Вселенную»* (особенно главы с 6 по 8) будут знакомы почти со всем материалом и могут свободно пропустить эту главу и переходить к следующей.

Вспомним, как отмечалось в главе 9, что даже слабый магнит может пересилить притяжение всей земной гравитации и притянуть вверх скрепку для бумаги. Численно это значит, что гравитационная сила составляет примерно 10^{-42} от величины электромагнитных сил.

Я могу заметить, что последователи другого подхода по соединению общей теории относительности с квантовой механикой, *петлевой квантовой гравитации*, которая будет коротко обсуждаться в главе 16, придерживаются той точки зрения, которая недалеко от первого из упомянутых выше предположений, — что на самых мелких масштабах пространство-время имеет дискретную структуру.

Связь с массой, возникающей из Хиггсова океана, будет обсуждаться в этой главе позже.

Филипп Пети — знаменитый французский канатоходец, прошедший в 1974 г. по канату, натянутому между башнями-близнецами в Нью-Йорке (теми самыми, что были разрушены в результате теракта 11 сентября 2001 г.). *(Прим. ред.)*

Если вы посчитаете все направления влево, вправо, по часовой стрелке и против часовой стрелки отдельно, вы придёте к заключению, что червяк может двигаться в четырёх измерениях. Но когда мы говорим о «независимых» измерениях, мы всегда группируем те из них, которые лежат вдоль одинаковых геометрических осей — вроде влево и вправо, а также по часовой стрелке и против часовой стрелки.

Позвольте мне подготовить вас к одному существенному результату, с которым мы столкнёмся в следующей главе. Струнные теоретики десятки лет знали, что уравнения, которые они обычно используют для математического анализа теории струн, являются приближёнными (точные уравнения оказывается трудно найти и понять). Однако большинство думает, что приближённые уравнения были достаточно точны для определения требуемого числа дополнительных измерений. Совсем недавно (и к изумлению большинства физиков, работающих в этой области) некоторые струнные теоретики показали, что приближённые уравнения теряют одно измерение; сейчас признано, что теория требует семь дополнительных измерений. Как мы увидим, это не компрометирует материал, обсуждаемый в этой главе, но показывает, что он должен быть вложен в более широкую, фактически ещё более унифицированную схему.

[{226}](#)

Точнее говоря, эти клейкие сущности называются *p-бранами Дирихле* или, для краткости, *D-p-бранами*. Мы будем придерживаться укороченного названия: *p-браны*.

Существует даже гипотеза, выдвинутая Лизой Рэндалл из Гарвардского университета и Раманом Сундрумом из университета Джона Хопкинса и состоящая в том, что гравитация тоже может быть заперта, но не липкой браной, а дополнительными измерениями, искривлёнными нужным образом, что ещё более смягчает ограничения на размер дополнительных измерений.

Джон Хэнкок — политический деятель времён борьбы американских колоний за независимость от английской метрополии. Он первым поставил свою подпись под мятежным документом — американской Декларацией независимости. Его подпись была столь размашистой и крупной, что, по его словам, сам король Георг III смог бы прочесть её и без очков. (*Прим. перев.*)

Фрэнк Синатра — единственный в истории певец, который смог через 50 лет вернуть себе былую популярность и любовь публики, записав шлягер «Нью-Йорк, Нью-Йорк». *(Прим. перев.)*

Известный американский тележурналист, ведущий телешоу. Помимо всего прочего известен своими семью законными жёнами и двумя гражданскими. (*Прим. ред.*)

В ноябре 2007 г. коллаборация «*Gravity Probe B*» объявила о подтверждении эффекта увлечения инерциальной системы отсчёта с точностью 30%. При обработке результатов измерений возникли трудности с учётом электрических зарядов в стенках прибора. К марту 2010 г. коллаборация надеется завершить обработку результатов. (*Прим. ред.*)

В составе проекта LIGO работают три установки. Третья, с длиной плеч 600 м, расположена близ Ганновера, Германия. С мая 2007 г. к анализу результатов LIGO стали присоединяться данные французско-итальянского инструмента VIRGO — гравитационной антенны аналогичной конструкции с длиной плеч 3 км. На начало 2008 г. гравитационные волны не обнаружены. (*Прим. ред.*)

Одной из таких модернизаций является запланированный проект LISA (Laser Interferometer Space Antenna — лазерный космический интерферометр), космическая версия LIGO, включающая в себя несколько космических кораблей, разделённых миллионами километров, играющих роль четырёхкилометровых труб LIGO. Установка LIGO будет также спарена с VIRGO, французско-итальянским детектором гравитационных волн, расположенным в окрестностях города Пиза.

Пуск LHC состоялся 10 сентября 2008 г., но выход на проектную мощность запланирован на лето 2009 г. (*Прим. ред.*)

К настоящему времени установки HiRes и детектор имени Пьера Оже зафиксировали частицу с энергией более 10^{20} эВ (100 млрд масс протона).
(Прим. ред.)

Установка Пьера Оже в настоящее время (конец 2008 г.) работает уже около двух лет, но о следах чёрных дыр пока не сообщалось. (*Прим. ред.*)

Запуск обсерватории «Planck» намечен на весну 2009 г. (*Прим. ред.*)

Поскольку сутью телепортации является перемещение объекта из одного места в другое, в этом разделе я часто буду говорить так, как будто частицы занимают определённое положение. Строго говоря, мне всегда следовало бы вместо выражений типа «частица, находящаяся здесь» использовать более пространные фразы вида «частица, которая с высокой вероятностью находится здесь» или «частица, которая с вероятностью 99% находится здесь», но для краткости я буду говорить более вольно.

Спортивный автомобиль «DeLorean DMC-12», известный по фильму «Назад в будущее», где он сыграл роль машины времени. (*Прим. перев.*)

В оригинале United Quantum Van Lines — переключка с существующей крупнейшей американской транспортной компанией United Van Lines. (Прим. перев.)

Знаменитая марка американского мороженого, популярного и за пределами США. (*Прим. перев.*)

Квантовое состояние совокупности частиц (в отличие от индивидуальных частиц) отражает также связи между всеми частицами этой совокупности. Таким образом, точно воспроизводя квантовое состояние частиц, составляющих «Делориан», мы гарантируем, что все они находятся в той же связи друг с другом; единственная разница будет состоять в том, что их положение в целом будет смещено из Нью-Йорка в Лондон.

Хрупкость человеческого тела — другое практическое ограничение: ускорение, требующееся для достижения таких высоких скоростей за разумный промежуток времени, находится далеко за пределами того, что может выдержать тело. Также заметим, что замедление времени позволяет, в принципе, достигать невероятно отдалённых мест пространства. Если в галактику Андромеды запустить с Земли ракету, развивающую скорость в 99,9999999999999999% от скорости света, то нам потребовалось бы ждать её возвращения около 6 млн лет. Но при такой скорости время на ракете столь сильно замедляется по отношению к ходу времени на Земле, что сам космонавт по возвращении постареет только на восемь часов (если игнорировать тот факт, что космонавт не смог бы выдержать ускорение при разгоне, повороте и торможении).

Один из последователей нейролингвистического программирования (НЛП), нестандартного подхода к психологии и человеческой коммуникации. Очень популярен в США благодаря своим публичным семинарам, после которых его участники запросто проходят по раскалённым углям, не получая никаких ожогов. *(Прим. перев.)*

Еще один персонаж сериала о семейке Симпсонов, злейший враг Барта. *(Прим. перев.)*

Более подробно о геометрической дуальности циклических измерений и многообразий Калаби–Яу см. главу 10 книги «Элегантная Вселенная».

Тапперуэровский контейнер — пластиковый контейнер для хранения пищевых продуктов и других кухонных аксессуаров производства компании «Тапперуэр корпорейшн». Эти контейнеры примечательны тем, что распространяются не в магазинах, а на так называемых «тапперуэровских вечеринках», а теперь и через Интернет. (*Прим. перев.*)

Если вам не хочется переписывать Платона, то модель мира на бране дает голографическую версию мира, в которой тени вновь занимают надлежащее место. Представим, что мы живём на 3-бране, окружающей четырёхмерную область (подобно тому как двумерная кожица яблока окружает его трёхмерную внутренность). В такой модели мира голографический принцип скажет, что наши трёхмерные ощущения являются тенями четырёхмерной физики, происходящей в области, окружённой нашей браной.

comments

Комментарии

Альберт Майкельсон сослался на лорда Кельвина на церемонии открытия физической лаборатории Райерсона в университете Чикаго в 1894 г. (см.: Kleppner D. *Physics Today*. November 1998).

Lord Kelvin. Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light. *Phil. Mag.* li-6th series. 1901. № 1.

Einstein A., Rosen N., and Podolsky B. *Phys. Rev.* 1935. № 47. P. 777.

Sir Arthur Eddington. *The Nature of the Physical World*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1928.

Как будет показано в примечании 2 главы 6, это несколько преувеличенное утверждение, поскольку есть примеры, включающие довольно необычные частицы (такие как К-мезоны и В-мезоны), которые показывают, что для так называемых слабых ядерных сил направление времени не полностью симметрично. Но, поскольку эти частицы не играют существенной роли в определении свойств обычных материальных объектов, то мне и многим другим, размышлявшим над этим, кажется маловероятным, что эти примеры существенны для разгадки природы стрелы времени (хотя, поспешу добавить, никто не знает этого наверняка). Таким образом, хотя, в принципе, это несколько преувеличенное утверждение, везде в дальнейшем я буду предполагать, что для законов физики направление времени безразлично.

Намёк на книгу Тимоти Ферриса «Возмужание на окраине Млечного Пути» (Ferris T. *Coming of Age in the Milky Way*. New York: Anchor, 1989).

Newton I. *Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*. Trans. A. Motte and Florian Cajori. Berkley: University of California Press, 1934. Vol. 1. P. 10.

Newton I. *Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*. Trans. A. Motte and Florian Cajori. Berkley: University of California Press, 1934. Vol. 1. P. 6.

Newton I. *Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*. Trans. A. Motte and Florian Cajori. Berkley: University of California Press, 1934. Vol. 1. P. 6.

Высказывание Альберта Эйнштейна, приведённое в предисловии к книге: Jammer M. *Concepts of Space: The Histories of Theories of Space in Physics*. New York: Dover, 1993.

Hall A. R. *Isaac Newton, Adventurer in Thought*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1992. P. 27.

Hall A. R. *Isaac Newton, Adventurer in Thought*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1992. P. 27.

H. G. Alexander, ed. *The Leibniz-Clarke Correspondence*. Manchester: Manchester University Press, 1956.

Я выбрал Лейбница как яркого представителя тех, кто был против приписывания пространству существования, независимого от находящихся в нём объектов, но и многие другие учёные также энергично отстаивали реляционную позицию — среди них Христиан Гюйгенс и епископ Беркли.

См., например: Jammer M. *Concepts of Space*. P. 116.

Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. Критические заметки об одной реакционной философии. М.: Издательство политической литературы, 1984.

Для математически подкованных читателей приведём эти четыре уравнения:

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \operatorname{div} B = 0, \quad \operatorname{rot} E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0, \quad \operatorname{rot} B - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t} = \mu_0 J,$$

где E , B , ρ , J , ε_0 , μ_0 обозначают напряжённость электрического поля, напряжённость магнитного поля, плотность электрического заряда, плотность электрического тока, диэлектрическую проницаемость и магнитную восприимчивость вакуума соответственно. Как видно, уравнения Максвелла связывают скорость изменения электромагнитного поля с наличием электрических зарядов и токов. Нетрудно показать, что эти уравнения дают для скорости электромагнитных волн величину

$1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$, являющуюся, фактически, скоростью света в вакууме.

Есть некоторое разногласие по поводу того, какую роль сыграли эти эксперименты при создании специальной теории относительности. В биографии Эйнштейна (см.: Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна / Пер. с англ. М.: Наука, 1989) Абрахам Пайс, ссылаясь на поздние заявления Эйнштейна, утверждает, что он знал о результатах эксперимента Майкельсона-Морли. Альбрехт Фользинг в своей биографии Эйнштейна (Fölzing A. *Albert Einstein: A Biography*. New York: Viking Press, 1997. P. 217–220) также утверждает, что Эйнштейн был осведомлён как о результатах опыта Майкельсона-Морли, так и о более ранних отрицательных результатах поиска эфира, таких как работа Армана Физо. Но Фользинг и многие другие историки науки утверждают, что эти эксперименты играли в лучшем случае лишь вторичную роль в размышлениях Эйнштейна. Эйнштейн в основном руководствовался соображениями математической симметрии и простоты, а также поразительной физической интуицией.

Мы видим объекты с помощью света: чтобы увидеть объект, свет должен дойти от него до наших глаз. Аналогично, чтобы увидеть свет, сам свет должен дойти до наших глаз. Поэтому есть некая условность в моём утверждении, когда я говорю, что Барт видит удаляющийся от него свет. Можно представить себе, что Барт имеет группу помощников, движущихся с его скоростью, но находящихся в различных местах вдоль «гоночной трассы». Эти помощники сообщают Барту, какой отметки трассы и в какое время достиг свет. На основе этой информации Барт может затем вычислить, с какой скоростью удаляется от него свет.

Есть несколько подходов к выводу преобразований координат и времени в специальной теории относительности Эйнштейна. Заинтересованный читатель может посмотреть главу 2 моей предыдущей книги (*Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории* / Пер. с англ.; Общ. ред. В. О. Малышенко. М.: URSS, 2007) (вместе с математическим выкладками, приведёнными в примечаниях к этой главе). Чёткие рассуждения с техническими деталями приводятся в книге: *Тейлор Э. Ф., Уилер Дж. А. Физика пространства-времени* / Пер. с англ. Н. В. Мицкевича. Изд. 2-е, дополненное. М.: Мир, 1971.

Остановка времени при движении со скоростью света — интересная идея, но не следует слишком увлекаться ею. Дело в том, что специальная теория относительности показывает, что ни один материальный объект никогда не сможет достичь скорости света: чем быстрее он движется, тем труднее его «подтолкнуть», чтобы придать бóльшую скорость. Чтобы разогнать объект до скорости света, ему надо дать бесконечно сильный толчок, что попросту невозможно сделать. Таким образом, «безвременной» характер фотона ограничен объектами с *нулевой массой* (фотон является примером такого объекта), и поэтому «безвременность» навсегда за пределами достижимого всех объектов, за исключением немногих частиц. Хотя может быть интересным и полезным вообразить, как Вселенная будет выглядеть при движении со скоростью света, но в конечном счёте нам стоит сосредоточиться на том, что реально достижимо для материальных объектов, таких как мы с вами, если мы хотим понять, как специальная теория относительности влияет на наше представление о времени.

См.: *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. С. 110.

Точнее говоря, *мы говорим, что вода вращается*, если её поверхность принимает вогнутую форму, и не вращается — если не принимает такую форму. С точки зрения Маха, в пустом пространстве нет понятия вращения, так что поверхность воды всегда будет плоской (или, чтобы избежать вопросов, связанных с отсутствием гравитации, мы можем сказать, что верёвка, связывающая два камня, всегда будет оставаться ненатянутой). Здесь же утверждается, что в специальной теории относительности есть понятие вращения даже в пустой Вселенной, поэтому поверхность воды может стать вогнутой (и может натянуться верёвка, связывающая два камня). В этом смысле специальная теория относительности противоречит идеям Маха.

Fölsing A. *Albert Einstein: A Biography*. 1997. P. 208–210.

Математически подкованный читатель заметит, что если выбрать единицы измерений так, что скорость света будет равняться единице (этого можно достичь, взяв, например, секунду за единицу времени и световую секунду, равную 300 тыс. км, за единицу длины), то свет будет двигаться по пространству-времени под углом 45° по отношению к оси времени (потому что для такой диагональной линии одной единице пространства будет соответствовать одна единица времени, двум единицам пространства — две единицы времени и т. д.). Поскольку ничто не может превысить скорость света, то любой материальный объект должен покрывать меньшее расстояние за единицу времени, чем луч света, и, следовательно, его траектория в пространстве-времени должна быть наклонена к оси времени под углом, меньшим 45° . Более того, Эйнштейн показал, что зависимость между временем $t_{\text{движущ}}$ движущегося со скоростью v наблюдателя и временем $t_{\text{стационарн}}$ покоящегося наблюдателя (предположим для простоты, что пространство одномерно) даётся формулой

$$t_{\text{движущ}} = \gamma \left(t_{\text{стационарн}} - \left(\frac{v}{c^2} \right) x_{\text{стационарн}} \right),$$

где $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ и c — скорость света. В принятых нами единицах $c = 1$, поэтому $v < 1$ и, следовательно, временные слои для движущегося наблюдателя (где $t_{\text{движущ}}$ фиксировано) задаются уравнением

$$t_{\text{стационарн}} - vx_{\text{стационарн}} = \text{const.}$$

Такие срезы наклонены под некоторым углом к временным слоям стационарного наблюдателя ($t_{\text{стационарн}} = \text{const}$), а поскольку $v < 1$, то угол между ними не может превосходить 45° .

Для математически подкованного читателя это утверждение можно строго сформулировать следующим образом: геодезические линии пространства-времени Минковского (пути экстремальной длины между двумя точками пространства-времени) являются геометрическим объектами, не зависящими от выбора координат или системы отсчёта. Эти линии являются внутренними, абсолютными геометрическими свойствами пространства-времени. Точнее говоря, в стандартной метрике Минковского геодезические (времениподобные) линии являются прямыми (составляющими с осью времени угол меньше 45° , поскольку скорость материального объекта не может превышать скорость света).

Есть ещё кое-что важное, с чем согласятся все наблюдатели, независимо от скорости их движения. Это подразумевается в нашем описании пространства-времени, но стоит сказать об этом прямо! Если одно событие является причиной другого (я кинул камень в окно, и окно разбилось), то все наблюдатели согласятся с тем, что причина стояла *перед* следствием (все согласятся, что я кинул камень *перед* тем, как окно разбилось). Для математически подкованного читателя это нетрудно показать с помощью нашего схематического описания пространства-времени. Если событие A является причиной события B , то линия, проведённая в пространстве-времени от A до B пересечёт каждый временной слой (временной слой наблюдателя, покоящегося по отношению к A) под углом, *превышающим* 45° . Например, если события A и B произошли в одном и том же месте пространства (от резинки, натянутой вокруг моего пальца [событие A] мой палец побелел [событие B]), то линия, соединяющая A и B , перпендикулярна плоскостям временных слоёв (составляет с ними угол 90°). Если же события A и B произошли в разных точках пространства (камень летит в окно), то всё же влияние из A в B передавалось со скоростью, не превышающей скорость света, откуда следует, что соответствующая траектория в пространстве-времени не может отклониться от оси времени на угол, *превышающий* 45° , и, значит, угол между траекторией и любым временным слоем всегда *больше* 45° . (Вспомните из примечания 9, что только свет может отклоняться на максимальный угол 45° по отношению к оси времени.) Временные слои движущегося наблюдателя наклонены под углом к временным слоям неподвижного наблюдателя, но этот угол наклона всегда *меньше* 45° (поскольку относительная скорость движения двух наблюдателей не может превышать скорость света). И, поскольку угол траектории, связанной с причинно связанными событиями, всегда *больше* 45° , то эта траектория не может пересечь временной слой, относящийся к следствию, *раньше* слоя, относящегося к причине. Поэтому для всех наблюдателей причина всегда предшествует следствию.

Кроме того, если влияние могло бы распространяться быстрее света, это нарушало бы причинность.

Newton I. *Sir. Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*. P. 634.

Поскольку гравитационное притяжение Земли меняется от точки к точке, то свободно падающий наблюдатель (имеющий ненулевые размеры) всё же может обнаружить остаточное воздействие гравитационной силы. А именно, если этот наблюдатель выпустит по бейсбольному мячу из двух своих вытянутых в стороны рук, то каждый из мячей полетит по своей траектории к центру Земли. Поэтому с точки зрения этого наблюдателя он сам будет падать строго вниз к центру Земли, тогда как мяч, выпущенный из правой руки, будет падать с еле заметным отклонением влево, а мяч, выпущенный из левой руки, будет падать с едва заметным отклонением вправо. Проводя тщательные замеры, наблюдатель заметит, что расстояние между мячами мало-помалу сокращается; они двигаются навстречу друг другу. Здесь важно то, что мячи были выпущены в разных, хотя и близких, точках пространства, поэтому их траектории свободного падения по направлению к центру Земли, хотя и почти незаметно, но отличаются. Таким образом, более точное утверждение, отражающее догадку Эйнштейна, состоит в том, что чем меньше размеры объекта, тем полнее он может устранить гравитацию в своём свободном падении. Но в нашем обсуждении этим обстоятельством можно благополучно пренебречь, хотя оно и важно в принципе.

Для математически подготовленного читателя приведём уравнения Эйнштейна: $G_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}$, где в левой части стоит тензор Эйнштейна, описывающий кривизну пространства-времени, а в правой части — тензор энергии-импульса $T_{\mu\nu}$, описывающий распределение материи и энергии во Вселенной.

Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. Т. 2. М.: Мир, 1977. С. 192–195.

В 1954 г. Эйнштейн писал коллеге: «Кстати, о принципе Маха вообще больше говорить не стоит» (цитируется по книге: *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. С. 279).

Как отмечалось ранее, следующие идеи были впоследствии приписаны Маху, хотя он сам никогда не выражал их столь буквально.

С той оговоркой, что объекты, настолько удалённые от нас, что с момента рождения Вселенной их свет или гравитационное воздействие ещё нас не достигли, не влияют на ощущаемую нами гравитацию.

Искушённый читатель заметит, что, формально говоря, это слишком сильное утверждение, поскольку для пустого пространства имеются нетривиальные решения общей теории относительности (т. е. такие, которые дают не пространство Минковского, а нечто более сложное). Здесь я просто использую тот факт, что специальная теория относительности может рассматриваться как специальный случай общей теории относительности, если не учитывать гравитацию.

Строго говоря, не все физики и философы согласны с этим заключением. Хотя Эйнштейн отказался от принципа Маха, в течение последних тридцати лет этот принцип вёл собственную жизнь. Выдвигались различные версии и интерпретации идей Маха. Так, например, некоторые физики предполагали, что общая теория относительности в своей основе охватывает идеи Маха, и только некоторые особые формы, которые может иметь пространство-время, — такие как бесконечное плоское пространство-время в пустой Вселенной, — не отвечают принципу Маха. Возможно, предполагали они, любое пространство-время, которое хотя бы отдалённо реалистично (населено звёздами и галактиками и т. д.), удовлетворяет принципу Маха. Другие предлагали новые формулировки принципа Маха, в которых дело было больше не в том, как объекты, подобные связанным верёвкой камням или наполненному водой ведру, ведут себя Вселенной, а скорее в том, как различные временные слои — различные геометрии трёхмерного пространства — связаны друг с другом во времени. Поучительные ссылки на современное осмысление этих идей содержатся в книге *Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity* (Julian Barbour and Herbert Pfister, eds. Berlin: Birkhäuser, 1995), являющейся сборником статей по данной теме. В этой книге содержится также опрос примерно сорока физиков и философов по поводу их взгляда на принцип Маха. Большинство (90%) согласны, что общая теория относительности не полностью согласуется с идеями Маха. Другое чрезвычайно интересное обсуждение этих идей с точки зрения, поддерживающей идеи Маха, и на уровне, доступном широкому читателю, содержится в книге: Barbour J. *The End of Time: The Next Revolution in Physics*. (Oxford: Oxford University Press, 1999).

Склонному к математике читателю будет интересно узнать — Эйнштейн считал, что пространство-время не существует отдельно от своей метрики (метрика — математическое понятие, дающее меру расстояния в пространстве-времени), поэтому, если удалить всё, включая метрику, то пространство-время уже *не* будет представлять собой нечто. Под «пространством-временем» я всегда имел в виду многообразие вместе с метрикой, являющейся решением уравнений Эйнштейна, следовательно, мы приходим к выводу, который на математическом языке звучит так: метрическое пространство-время есть нечто.

Jammer M. *Concepts of Space*. P. xvii.

Точнее говоря, таково средневековое представление, корни которого восходят к Аристотелю.

Как мы обсудим позже, встречаются ситуации (такие как Большой взрыв и чёрные дыры), в которых остаётся много тайн, по крайней мере в отношении экстремально малых расстояний и огромных плотностей, когда перестаёт быть справедливой даже более изощрённая теория Эйнштейна. Так что приведённое здесь утверждение относится ко всем ситуациям, кроме экстремальных, в которых перестают работать известные законы физики.

Один из первых читателей этого текста неожиданно оказался сведущ в колдовстве и сообщил мне, что то, что путешествует через пространство и исполняет желания колдуна, называется «духом». Так что мой пример с колдовством, возможно, неудачен. Тем не менее идея ясна.

Во избежание путаницы я ещё раз подчеркну, что утверждения типа «Вселенная не является локальной» или «Нечто, происходящее здесь, может быть переплетено с чем-то там» не подразумевают возможность мгновенно управлять чем-то удалённым. Как будет ясно из дальнейшего, эффект, на который я ссылаюсь, проявляется в качестве *корреляции* между событиями — обычно в форме корреляций между результатами измерений, — происходящими в отдалённых друг от друга местах (таких что даже свет не успел бы преодолеть расстояние между ними). Таким образом, я имею в виду то, что физики называют *нелокальными корреляциями*. На первый взгляд может показаться, что в таких корреляциях нет ничего удивительного. Если кто-то посылает вам посылку с одной перчаткой, а другую перчатку из той же пары посылает вашему другу за тысячи миль от вас, то будет корреляция между тем, что каждый из вас увидит, открыв свою посылку: если вы увидите перчатку на левую руку, то ваш друг увидит перчатку на правую руку, и наоборот. И, понятно, в этих корреляциях нет ничего загадочного. Но, как увидим мы в дальнейшем, корреляции квантового мира носят совсем другой характер. Это как если бы вы имели пару «квантовых перчаток», в которой каждая перчатка может быть левой или правой, и каждая раскрывает свою «ориентацию» только в момент надлежащего наблюдения или измерения. И странность здесь в том, что хотя каждая перчатка может совершенно случайно стать правой или левой, но перчатки всегда оказываются парными, даже если они далеко разнесены: если одна оказывается левой, то другая — правой, и наоборот.

Предсказания квантовой механики потрясающе точно согласуются с экспериментальными наблюдениями. С этим согласны все. Тем не менее, поскольку понятия квантовой механики весьма непривычны для нашего повседневного опыта, и отчасти из-за этого имеются различные математические формулировки теории (и различные представления о том, как теория преодолевает разрыв между явлениями микромира и измеряемыми в макромире величинами), то нет согласия в том, как *интерпретировать* различные особенности теории (и загадочные результаты экспериментов, которые теория тем не менее может объяснить математически), включая вопросы нелокальности. В данной главе я принял ту точку зрения, которую посчитал самой убедительной, основываясь на современных теоретических представлениях и экспериментальных результатах. Но я подчёркиваю, что не все соглашались с этой точкой зрения, и в дальнейшем, разъяснив свои взгляды, я кратко отмечу некоторые другие точки зрения и укажу, где можно подробнее прочесть о них. Я также хочу особо подчеркнуть, что упомянутые эксперименты противоречат вере Эйнштейна в то, что их результаты могут быть объяснены исключительно на основе представления о том, что частицы всегда имеют определённые, хотя и скрытые, характеристики, *не привлекая при этом идею нелокальной связи*. Однако несостоятельность этой веры приводит к отказу только от представления о локальной Вселенной; при этом не отбрасывается возможность того, что частицы имеют определённые скрытые характеристики.

Для математически подкованного читателя следует отметить один аспект, который может ввести в заблуждение. Для многочастичных систем волна вероятности (обычно называемая волновой функцией) имеет по сути ту же интерпретацию (как только что описанную), но определяется как функция на *конфигурационном пространстве* всех частиц (для одной частицы конфигурационное пространство изоморфно реальному пространству, но для системы N частиц оно имеет $3N$ измерений). Важно не забывать об этом, размышляя над тем, является ли волновая функция реальной физической сущностью или просто математическим приёмом, — ведь если занять первую позицию, то потребуются принять реальность и конфигурационного пространства — интересная вариация на темы глав 2 и 3. Поля в релятивистской квантовой теории поля можно определить в обычном четырёхмерном пространстве-времени, хотя имеются и не так широко используемые формулировки, в которых вводятся обобщённые волновые функции — так называемые волновые функционалы, определяемые на ещё более абстрактном пространстве, *пространстве полей*.

Я имею в виду эксперименты по фотоэлектрическому эффекту, в которых свет, направленный на кусок металла, выбивает электроны с его поверхности. Экспериментаторы обнаружили, что чем выше интенсивность света, тем больше испускается электронов. Более того, эксперименты показали, что энергия каждого испущенного электрона определяется цветом (т. е. частотой) света. Эйнштейн указал, что это легко понять, если представить себе луч света состоящим из частиц, и тогда большая интенсивность света означает большее количество частиц света (фотонов) в луче — а чем больше фотонов, тем с большим числом электронов они столкнутся и выбьют с поверхности металла. Далее, частота света определяет энергию каждого фотона и, значит, и энергию каждого испущенного электрона, что находится в точном соответствии с экспериментальными данными. Корпускулярные свойства фотонов были окончательно подтверждены в 1923 г. Артуром Комптоном в экспериментах по упругому рассеянию фотонов на электронах.

Institut International de Physique Solvay. *Rapport et discussions du 5ème Conseil*. Paris, 1928. P. 253ff.

Born I., trans. *The Born-Einstein Letters*. New York: Walker, 1971. P. 223.

Stapp H. *Nuovo Cimento*. 1977. № 40B. P. 191–204.

Дэвид Бом является одним из самых творческих умов, работавших в квантовой механике на протяжении XX в. Он родился в Пенсильвании в 1917 г. и был студентом Роберта Оппенгеймера в Беркли. Во время преподавания в Принстонском университете он был вызван в Комитет по расследованию антиамериканской деятельности, но отказался давать показания на слушаниях. Дэвид Бом был вынужден покинуть США и стал профессором университета Сан-Паоло в Бразилии, затем в Технионе в Израиле и, наконец, в Биркбек-колледже Лондонского университета. Дэвид Бом жил в Лондоне до своей смерти в 1992 г.

Конечно, если подождать достаточно долго, то воздействие, оказанное вами на одну частицу, может, в принципе, передаться другой: первая частица могла бы послать сигнал, оповещающий вторую, что она подверглась измерению, и этот сигнал мог бы повлиять на вторую частицу. Однако, поскольку ни один сигнал не может распространяться быстрее света, такого рода влияние не может быть мгновенным. Самое главное в нашем рассуждении состоит в том, что в тот самый момент, когда мы измеряем спин одной частицы относительно выбранной оси, мы сразу же узнаём спин другой частицы относительно этой же оси. Так что любой вид «стандартного» сообщения между частицами — посредством света или с ещё более низкой скоростью связи — не имеет отношения к делу.

В этом и следующем разделах я излагаю суть открытия Белла, используя «инсценировку», вдохновлённую превосходными статьями Дэвида Мермина «Quantum Mysteries for Anyone» (*Journal of Philosophy*. 1981. № 78. Р. 397–408); «Can You Help Your Team Tonight by Watching on TV?» (in *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*. J. T. Cushing and E. McMullin, eds. University of Notre Dame Press, 1989); «Spooky Action at a Distance: Mysteries of the Quantum Theory» (in *The Great Ideas Today*. Encyclopaedia Britannica Inc., 1988), которые все собраны в книге: Mermin N. D. *Boojums All the Way Through*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1990. Интересующимся более формальным изложением идей с техническими деталями лучше всего начать с собственных статей Белла, многие из которых собраны в его книге: Bell J. S. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997.

В то время как предположение о локальности является ключевым в аргументации Эйнштейна, Подольского и Розена, исследователи пытались найти ошибки и в других элементах их рассуждения, чтобы избежать вывода, что Вселенная допускает нелокальные свойства. Например, иногда утверждается, что всё, что требуют результаты экспериментов — это отказаться от так называемого реализма — представления, согласно которому объекты обладают своими характеристиками независимо от процесса измерения. Однако это ничего не решает. Если доводы ЭПР были бы подтверждены экспериментом, не было бы ничего удивительного в дальнодействующих корреляциях квантовой механики; они были бы не более удивительны, чем классические дальнодействующие корреляции — того же рода, что обнаружив левую перчатку здесь, вы можете с уверенностью утверждать, что её пара, находящаяся где-то там, будет обязательно правой. Но доводы ЭПР были опровергнуты результатами Белла/Аспекта. Однако если в ответ на опровержение ЭПР мы откажемся от реализма (как мы поступаем в стандартной квантовой механике), это никак не уменьшит ошеломляющую загадочность дальнодействующих корреляций между далеко разнесёнными друг от друга *случайными* процессами; когда мы отказываемся от реализма, перчатки, как в примечании [\[43\]](#), становятся «квантовыми перчатками». Отказ от реализма никоим образом не делает наблюдаемые нелокальные корреляции хоть сколько-нибудь менее странными. Хотя, конечно, верно, что если в свете результатов ЭПР, Белла и Аспекта мы попытаемся сохранить реализм (например, как в теории Боба), то для согласования с имеющимися данными потребуется ещё более сильная нелокальность, включающая нелокальность взаимодействий, а не только нелокальность корреляций. Многие физики воздерживаются от такого выбора и, таким образом, отказываются от реализма.

Специальная теория относительности запрещает всему, что когда-либо двигалось медленнее скорости света, пересекать барьер скорости света. Но, строго говоря, специальная теория относительности не запрещает чему-то *всегда* двигаться со скоростью, превышающей скорость света. Гипотетические частицы такого сорта называются *тахионами*. Большинство физиков считают, что тахионы не существуют, но другим нравится тешить себя возможностью их существования. Однако, по большей части из-за странных свойств, которые эти частицы имели бы согласно уравнениям специальной теории относительности, никто не нашёл для них полезного применения — даже гипотетически. В настоящее время теории, в которых появляются тахионы, обычно выглядят страдающими от нестабильности.

Склонный к математике читатель должен отметить: по сути, специальная теория относительности утверждает, что законы физики должны быть инвариантными относительно преобразований Лоренца, т. е. инвариантными относительно $SO(3,1)$ -преобразования координат пространства Минковского. Следовательно, квантовая механика будет согласована со специальной теорией относительности, если её можно сформулировать так, что она будет инвариантна относительно преобразований Лоренца. В настоящее время релятивистская квантовая механика и релятивистская квантовая теория поля далеко продвинулись по направлению к этой цели, но пока ещё нет полного согласия в том, решается ли в них проблема квантового измерения инвариантным относительно преобразования Лоренца образом. Например, в релятивистской квантовой теории поля можно рассчитать амплитуды вероятности и вероятности исхода различных экспериментов полностью Лоренц-инвариантным способом. Но стандартная трактовка спотыкается на описании, каким же образом конкретный результат измерения возникает из всего спектра квантовых возможностей — т. е. что же происходит в процессе измерения. Это особенно важная проблема для запутывания как явления, которое зависит от того, что делает экспериментатор, — от акта измерения характеристик одной из запутанных частиц. Более детальное обсуждение можно найти в книге: Maudlin T. *Quantum Non-locality and Relativity*. Oxford: Blackwell, 2002.

Для склонного к математике читателя привожу соответствующий расчёт. Допустим, спин измеряется относительно трёх осей: вертикальной и двух, отклонённых от вертикали на угол 120° по и против часовой стрелки соответственно (полдень, четыре и восемь часов на циферблате часов соответственно). Пусть точно между двумя детекторами возникает пара электронов в так называемом синглетном состоянии. В этом состоянии суммарный спин двух электронов всегда равен нулю, так что если спин одного из электронов оказывается направленным вверх, то спин другого электрона обязательно будет направлен вниз. (Вспомните, что ради простоты я раньше рассматривал ситуацию, когда спины электронов всегда совпадают, а не противоположны. Но это совершенно не важно: вы можете представить, что детекторы откалиброваны противоположным образом, так что один из них всегда указывает на противоположное направление по отношению к тому, что есть на самом деле.) Элементарные рассуждения из квантовой механики показывают, что если угол между осями измерения спина на двух детекторах составляет θ , то вероятность того, что их показания окажутся противоположными, равна $\cos^2(\theta/2)$. Таким образом, если оси детекторов направлены одинаково ($\theta = 0$), то их показания всегда противоположны (это отвечает утверждению основного текста книги, что показания всегда одинаковы — помните о перекалибровке одного из датчиков), а если угол между их осями составляет $+120^\circ$ или -120° , то вероятность регистрации ими противоположных спинов составляет $\cos^2(\pm 60^\circ) = 1/4$. Если же оси детекторов выбираются случайным образом и независимо друг от друга, то в $1/3$ случаев их направления совпадут, а в $2/3$ случаев — нет. Итого, ожидаемая вероятность обнаружения противоположных спинов равна $(1/3) \cdot 1 + (2/3) \cdot (1/4) = 1/2$, что и обнаруживается в эксперименте.

Вам может показаться странным, что предположение о локальности Вселенной ведёт к более высокой корреляции спина (больше 50%), чем в традиционном подходе квантовой механики, допускающем дальное действие посредством мгновенного коллапса волны вероятности (ровно 50%). Вы могли бы подумать, что дальнедействующее запутывание должно приводить к большей корреляции. Фактически, так оно и есть. Подумайте вот над чем: с результатом лишь 50% для корреляции по всем измерениям квантовая механика гарантирует 100%-ю корреляцию результатов в случае

одинаковой направленности осей детекторов. А в локальной Вселенной Эйнштейна–Подольского–Розена, чтобы гарантировать 100%-е согласие показаний для однонаправленных осей детекторов, требуется 55%-я корреляция по всем измерениям. Значит, грубо говоря, в локальной Вселенной 50%-я корреляция по всем измерениям дала бы *менее* чем 100%-ю корреляцию для одинаково направленных осей, т. е. корреляция получается меньшей, чем в нелокальной квантовой Вселенной.

Вы могли бы подумать, что мгновенный коллапс волны вероятности с самого начала нарушает предел скорости, устанавливаемый светом, и тем самым вызывает конфликт со специальной теорией относительности. И если волны вероятности были бы действительно подобны волнам на поверхности воды, то конфликт был бы обеспечен. Тот факт, что волна вероятности внезапно падает до нуля на бескрайнем пространстве, был бы гораздо более шокирующим, чем если бы вся вода Мирового океана вдруг бы мгновенно застыла и перестала двигаться. Но, как утверждают сторонники квантовой механики, волны вероятности *не* подобны волнам на поверхности воды. Хотя волна вероятности описывает материю, но сама по себе она не материальна. Световой же барьер относится только к материальным объектам, чьё движение можно непосредственно видеть, чувствовать, обнаруживать. Если волна вероятности электрона упала до нуля в галактике Андромеды, то это просто означает, что андромедянский физик наверняка не сможет обнаружить у себя этот электрон. Никакое наблюдение в галактике Андромеды не обнаружит внезапного изменения волны вероятности, связанного с тем, что электрон уже обнаружен в Нью-Йорке. Нет никакого конфликта со специальной теорией относительности, так как сам электрон не перемещался из одного места в другое быстрее света. И, как можно видеть, происходит лишь обнаружение электрона в Нью-Йорке, ничего более. Скорость электрона даже не упоминалась в дискуссии. Таким образом, хотя схема мгновенного коллапса вероятности несёт с собой загадки и проблемы (они подробнее обсуждаются в главе 7), но она не обязательно подразумевает конфликт со специальной теорией относительности.

Некоторые из этих предложений обсуждаются в книге: Maudlin T. *Quantum Non-locality and Relativity*.

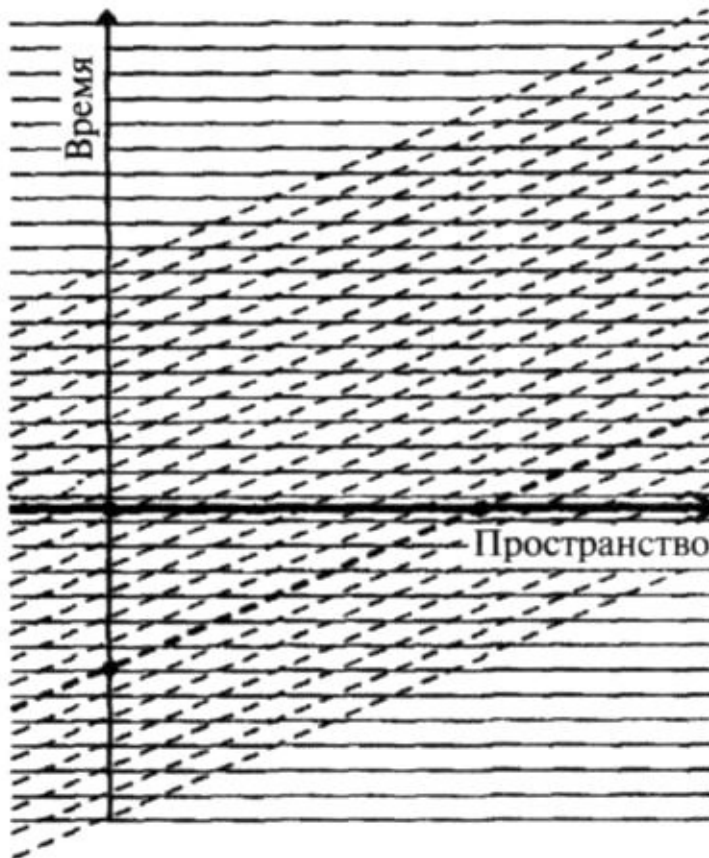
Для, читателя, склонного к математике, укажем, что из уравнения

$$t_{\text{движущ}} = \gamma \left(t_{\text{стационарн}} - \left(\frac{v}{c^2} \right) x_{\text{стационарн}} \right),$$

которое обсуждалось в примечании 9 к главе 3, мы приходим к тому, что список настоящего для Чуви в данный момент будет содержать события, которые наблюдатели на Земле будут полагать прошедшими на $(v/c^2)x_{\text{Земли}}$ ранее, где $x_{\text{Земли}}$ есть расстояние от Чуви до Земли. Здесь мы предполагали, что Чуви движется прочь от Земли. Для движения в направлении Земли v имеет противоположный знак, так что связанные с Землёй наблюдатели будут полагать, что такие события произойдут на $(v/c^2)x_{\text{Земли}}$ позднее. Выбирая $v = 18$ км/ч и $x_{\text{Земли}} = 10^{10}$ световых лет, находим, что $(v/c^2)x_{\text{Земли}}$ составит около 150 лет.

Это число — и аналогичное число, приведённое несколькими абзацами ниже при описании движения Чуви в направлении Земли, — было правильным на момент публикации книги. Но поскольку время здесь на Земле течёт, эти числа будут становиться несколько неточными.

Склонный к математике читатель должен заметить, что метафора сечения пространственно-временной буханки под разными углами представляет собой обычную концепцию *пространственно-временных диаграмм*, изучаемых в курсе специальной теории относительности. На пространственно-временных диаграммах всё трёхмерное пространство в данный момент времени с точки зрения наблюдателя, который считается стационарным, обозначается горизонтальной линией (или, на более продвинутых диаграммах, горизонтальной плоскостью), тогда как время обозначается вертикальной осью. (На нашем рисунке каждое сечение буханки — плоскость — представляет всё пространство в один момент времени, тогда как ось, идущая через середину буханки, от корки до корки, есть ось времени.) Пространственно-временная диаграмма обеспечивает наглядный способ представления точек, из которых составлен ваш слой настоящего и слой настоящего для Чуви.



Тонкие сплошные линии совпадают с временными слоями (слоями настоящего) для наблюдателей, покоящихся по отношению к Земле (для простоты мы представляем, что Земля не вращается и не подвержена никаким ускорениям, поскольку это ненужное усложнение картины), а тонкие пунктирные линии совпадают с временными слоями наблюдателей,двигающихся прочь от Земли, скажем, со скоростью 16,7 км/ч. Когда Чуви покоится относительно Земли, горизонтальные линии представляют его слои настоящего (и поскольку вы всё время покоитесь на Земле, эти тонкие сплошные линии всегда представляют ваши слои настоящего), а самая тёмная сплошная линия показывает слой настоящего, содержащий вас (левая тёмная точка) на Земле XXI в., и Чуви (правая тёмная точка), когда вы оба ещё сидите и читаете. Когда Чуви идёт в направлении от Земли, его слои настоящего представляются пунктирными линиями, а самая тёмная пунктирная линия представляет слой настоящего, содержащий самого Чуви (когда тот только что встал и отправился погулять). Заметим, что один из последующих пунктирных временных слоёв будет содержать гуляющего Чуви (если он всё ещё гуляет!) и вас в двадцать первом столетии, сидящего и читающего. Поэтому ваш единственный момент времени появится в двух списках настоящего у Чуви — в одном до того, как он отправился на прогулку, и в одном — после. Это демонстрирует ещё один способ, каким простое интуитивное представление о *сейчас* — при рассмотрении применительно к большим расстояниям — трансформируется специальной теорией относительности в концепцию с совершенно необычными свойствами. Далее, эти списки настоящего *не имеют отношения к причинности*: стандартная причинность (см. примечание [{27}](#)) остаётся полностью в силе. Список настоящего у Чуви резко изменяется (делает скачок) из-за того, что он сам перепрыгивает из одной системы отсчёта в другую. Но любой наблюдатель (используя любой хорошо определённый способ описания точек пространства-времени координатами) согласится с любым другим наблюдателем в отношении того, какие события на что могут влиять.

Albert Einstein and Michele Besso: Correspondence 1903–1955. P. Spezialy, ed. Paris: Hermann, 1972.

Данное обсуждение призвано придать качественный смысл тому, как переживания прямо *сейчас* вместе с памятью, которую вы имеете прямо *сейчас*, формируют основу ваших ощущений жизни, в которой вы имели эту память. Но если, например, ваш мозг и тело были каким-то образом приведены в точно то же состояние, в котором они находятся прямо сейчас, вы должны будете иметь то же самое ощущение прожитой жизни, которое подтверждает ваша память (предполагая, как я это делаю, что основа всех ощущений может быть найдена в физическом состоянии мозга и тела), даже если эти переживания никогда на самом деле не происходили, а были искусственно впечатаны в ваш мозг. Одно упрощение в обсуждении заключается в предположении, что мы можем чувствовать или переживать вещи, которые происходят в определённый момент времени, тогда как, на самом деле, требуется некоторое конечное время для обработки, для того чтобы мозг распознал и интерпретировал воздействие на входе. Хотя это и верно, но это не имеет особого значения для излагаемой мной точки зрения; это интересное, но совершенно не относящееся к делу усложнение, связанное с анализом представлений о времени в прямой связи с человеческими ощущениями. Как мы говорили раньше, различные жизненные примеры помогают делать наше обсуждение более обоснованным и интуитивно ясным, но это требует от нас отделять те аспекты обсуждения, которые более интересны с биологической точки зрения, в противоположность физической.

Вы можете поинтересоваться, как обсуждение в этой главе соотносится с нашим описанием в главе 3 объектов, «всегдадвигающихся» через пространство-время со скоростью света. Для не склонного к математике читателя грубый ответ состоит в том, что история объекта представляется кривой в пространстве-времени — путём через блок пространства-времени, который высвечивает каждое место, которое занимал объект в момент, когда он там был (примерно так, как мы видим на рис. 5.1). Интуитивное обозначение «движения» через пространство-время тогда может быть выражено на языке «без течения», путём просто указания этого пути (в противоположность представлению, что путь проходится на ваших глазах). «Скорость», связанная с этим путём, тогда измеряется величиной, определяемой длиной этого пути (от одной выбранной точки до другой), делённой на промежуток времени, измеренный часами, переносимыми кем-то или чем-то между двумя выбранными точками пути. Ещё раз, это есть подход, который не содержит какого-либо течения времени: вы просто смотрите на то, что говорят интересующие вас часы в двух представляющих интерес точках. Оказывается, что скорость, найденная таким способом, для *любого* движения равна скорости света. Математически подготовленный читатель немедленно обнаружит причину этого. Метрика в пространстве-времени Минковского есть

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2$$

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

(где dx^2 есть евклидова длина $dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$), тогда как время, измеряемое движущимися часами («собственное» время), даётся выражением $dt^2 = ds^2/c^2$. Так что, очевидно, скорость движения через пространство-время, определяемая выражением ds/dt , равна c .

Carnap S. R. Autobiography, in *The Philosophy of Rudolf Carnap*. P. A. Schilpp, ed. Chicago: Library of Living Philosophers, 1963. P. 37.

Отметим, что асимметрия, о которой идёт речь (стрела времени), возникает из порядка, в котором события имеют место во времени. Вы могли бы также поинтересоваться асимметрией самого времени — например, как мы увидим в дальнейших главах, в соответствии с некоторыми космологическими теориями время могло иметь начало, но оно может не иметь конца. Это разные понятия асимметрии времени, но наше обсуждение здесь сосредоточено на первом. Но даже в этом случае до конца главы мы придём к заключению, что асимметрия вещей во времени имеет отношение к специальным условиям в ранней истории Вселенной, а потому связывает стрелу времени с космологией.

Для склонного к математике читателя позвольте мне отметить более точно, что означает симметрия по отношению к обращению времени, и указать на одно интригующее исключение, значение которого для обсуждаемых нами в этой главе проблем ещё предстоит полностью осознать. Простейшее определение симметрии по отношению к обращению времени состоит в утверждении, что набор законов физики симметричен по отношению к обращению времени. Если задано любое решение уравнений, скажем $S(t)$, тогда $S(-t)$ тоже будет решением этих уравнений. Например, в ньютоновской механике с силами, которые зависят от положений частиц, если $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_{3n}(t))$ есть положения n частиц в трёх пространственных измерениях, то из того, что $x(t)$ является решением уравнений $d^2x(t)/dt^2 = F(x(t))$, следует, что $x(-t)$ также является решением уравнений Ньютона $d^2x(-t)/dt^2 = F(x(-t))$. Отметим, что $x(-t)$ представляет движение частиц, которые проходят через те же самые положения, что и в случае $x(t)$, но в обратном порядке и с противоположными скоростями.

В более общем смысле набор физических законов обеспечивает нас алгоритмом эволюции из начального состояния физической системы в момент времени t_0 к состоянию в некоторый другой момент времени $t + t_0$. Конкретно, этот алгоритм может быть рассмотрен как отображение $U(t)$, которое действует на начальное состояние $S(t_0)$ и приводит к состоянию $S(t + t_0)$, т. е. $S(t + t_0) = U(t)S(t_0)$. Мы говорим, что законы, приводящие к $U(t)$, являются симметричными во времени, если имеется отображение T , удовлетворяющее соотношению $U(-t) = T^{-1}U(t)T$. На обычном языке это уравнение говорит, что при помощи подходящих манипуляций над состоянием физической системы в один момент времени (достигаемых с помощью T) эволюция на время t вперёд во времени в соответствии с законами теории (выражаемыми через $U(t)$) становится эквивалентной эволюции системы на t единиц времени назад (обозначаемой $U(-t)$). Например, если мы определи состояние системы частиц в один момент времени через их положения и скорости, тогда T будет оставлять все положения частиц фиксированными и менять на противоположные все скорости. Эволюция такой конфигурации частиц вперёд во времени на промежуток t эквивалентна эволюции оригинальной конфигурации частиц

назад во времени на промежуток t . (Действие T^{-1} отменяет обращение скоростей так, что в конце не только положения частиц совпадают с теми, которые они имели t единиц времени назад, но то же будет и с их скоростями.)

Для некоторых законов оператор T более сложен, чем в случае ньютоновской механики. Например, если мы изучаем движение заряженных частиц в присутствии электромагнитного поля, одно только обращение скоростей частиц не приведёт к движению, в котором частицы проходят те же шаги в обратном порядке. Должно быть обращено также и направление магнитного поля. (Это требуется, чтобы член $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ в уравнении для силы Лоренца остался неизменным.) Таким образом, в этом случае операция T выполняет оба эти преобразования. Тот факт, что мы проделываем больше, чем просто обращаем все скорости частиц, никак не влияет на обсуждение, которое следует дальше в тексте. Всё, что имеет значение, это то, что движение частицы в одном направлении точно так же согласуется с законами физики, как и движение частицы в обратном направлении. То, что мы обращаем любые магнитные поля, которым случилось присутствовать, чтобы полностью обратить движение частиц, не имеет особого значения.

Ситуация становится более тонкой в случае слабых ядерных взаимодействий. Слабые взаимодействия описываются частным случаем квантовой теории поля (которая коротко обсуждается в главе 9), и общая теорема показывает, что квантовые теории поля (при условии, что они локальны, унитарны и Лоренц-инвариантны, — такие и представляют интерес) всегда симметричны относительно объединения операций сопряжения заряда C (которые заменяют частицы на их античастицы), чётности P (которые отражают координаты относительно начала) и чистой операции обращения времени T (которая заменяет t на $-t$). Так что мы можем определить оператор T как CPT , но если T -инвариантность безусловно требует введения операции CP , тогда T больше не может быть интерпретирован просто как прохождение частицами их движения в обратном направлении (поскольку, например, сам тип частицы будет изменён таким T — частицы будут заменены их античастицами, — а потому обратного движения оригинальных частиц уже не может быть). Оказалось, что имеются некоторые экзотические экспериментальные ситуации, в которых реализуется именно этот случай. Есть определённые виды частиц (К-мезоны, В-мезоны), манера поведения которых CPT -инвариантна, но не инвариантна относительно чистой операции обращения времени T . Это было установлено косвенно в 1964 г. Джеймсом Кронином,

Валом Фитчем и их сотрудниками (за что Кронин и Фитч получили в 1980 г. Нобелевскую премию), которые показали, что К-мезоны нарушают CP -симметрию (следовательно, они должны нарушать T -симметрию, чтобы не нарушать CPT -симметрию). Позднее нарушение T -симметрии было непосредственно установлено в эксперименте $CPLEAR$ в ЦЕРНе и в эксперименте $KTEV$ в Фермилабе. Грубо говоря, эти эксперименты продемонстрировали, что если вам показали фильм с записью процессов, происходящих с этими мезонами, то вы будете в состоянии определить, прокручивается ли этот фильм в правильном направлении, или в обратном. Другими словами, эти особые частицы могут различать прошлое и будущее. Остаётся неясным, однако, имеет ли это какое-нибудь отношение к стреле времени, которую мы ощущаем в повседневном контексте. Как-никак, это экзотические частицы, которые могут быть рождены на короткие моменты в высокоэнергетических столкновениях, но они не являются частями привычных материальных объектов. Для многих физиков, включая меня, кажется маловероятным, что необратимость времени, проявляемая этими частицами, играет роль в разрешении загадки стрелы времени, так что мы не будем дальше обсуждать этот исключительный пример. Но правда заключается в том, что никто не знает этого с уверенностью.

Я иногда обнаруживаю нежелание согласиться с теоретическим утверждением, что кусочки яичной скорлупы могли бы на самом деле собраться в целое яйцо. Но симметрия законов физики по отношению к обращению времени, как более подробно рассматривалось в предыдущем примечании, означает, что это то, что могло бы случиться. На микроскопическом уровне разбивание яйца есть физический процесс, затрагивающий различные молекулы, из которых состоит скорлупа. Скорлупа трескается, поскольку удар, которому подверглось яйцо, заставляет разделяться группы молекул. Если бы эти движения молекул происходили в обратном направлении, молекулы объединились бы снова, собрав скорлупу в первоначальную форму.

Чтобы не отклоняться от обсуждения современного понимания этих идей, я пропустил одну очень интересную историю. Собственные раздумья Больцмана по поводу энтропии существенно уточнялись в течение 1870-х – 1880-х гг., когда очень полезными оказались взаимодействия и обмен информацией с такими физиками, как Джеймс Клерк Максвелл, лорд Кельвин, Джозеф Лошмидт, Джозайя Уиллард Гиббс, Анри Пуанкаре, С. Х. Бербери и Эрнест Цермело. Фактически, Больцман сначала думал, что он сможет доказать, что для изолированной физической системы энтропия всегда и абсолютно не уменьшается, но не что просто очень маловероятно получить такое уменьшение энтропии. Но возражения, выдвинутые этими и другими физиками, постепенно привели Больцмана к статистическому и вероятностному подходу к этой теме, к тому, который используется и сегодня.

Я говорю об издании романа «Война и мир» в серии «Библиотека современной классики» (Modern Library Classics) в переводе на английский Констанции Гарнетт, содержащем 1386 страниц текста.

Для склонного к математике читателя следует заметить, что поскольку числа могут стать столь велики, то энтропия на самом деле определяется как логарифм числа возможных перестановок — но эта деталь не имеет отношения к рассматриваемой проблеме. Однако, с принципиальной точки зрения, это важно, поскольку очень удобно, что энтропия является так называемой аддитивной величиной. Это означает, что если вы объедините две системы вместе, энтропия их совокупности есть сумма их индивидуальных энтропий. Это остаётся правильным только для энтропии в форме логарифма, так как число перестановок в этом случае задаётся произведением индивидуального числа перестановок подсистем, так что логарифм числа перестановок является аддитивной величиной.

Поскольку мы можем, в принципе, предсказать, где приземлится каждая страница, вы можете подумать, что имеется дополнительный элемент, который определяет расположение страниц: как вы будете собирать страницы вместе в аккуратную пачку. Это не имеет отношения к обсуждаемой физике, но в случае, если вас это беспокоит, представьте, что вы договорились подбирать страницы одну за одной, начиная с той, которая к вам ближе всего, затем подберёте ближайшую за этой страницу и т. д. (И, например, для определения ближайшей страницы вы можете договориться измерять расстояние до ближайшего угла страницы.)

Надежда преуспеть в расчёте движения даже нескольких страниц с точностью, требуемой для предсказания их порядка (с учётом применения некоторого алгоритма складывания в пачку, как в предыдущем примечании), на самом деле экстремально оптимистична. В зависимости от гибкости и веса бумаги такой сравнительно «простой» расчёт может оказаться за пределами сегодняшних вычислительных возможностей.

Вас может смутить фундаментальное отличие в определениях понятия энтропии для расположения страниц и для коллективов молекул. Расположения страниц дискретны — вы можете пересчитать их одно за другим, так что, хотя полное число возможностей может быть большим, оно конечно. В противоположность этому, движение и положение даже отдельной молекулы непрерывно — вы не можете пересчитать их одно за другим, так что тут (по крайней мере, в соответствии с классической физикой) имеется бесконечное число возможностей. Как же можно провести точный счёт перестановок молекул? Короткий ответ состоит в том, что это хороший вопрос, но один из тех, на которые найдены полные ответы, — поэтому, если этого достаточно, чтобы успокоить вашу тревогу, свободно пропускайте следующий текст. Более длинный ответ требует немного математики, так что без определённых знаний его, наверное, будет трудно понять. Физики описывают классическую многочастичную систему, привлекая фазовое $6N$ -мерное пространство (где N есть число частиц), в котором каждая точка обозначает все положения и скорости всех частиц (для каждой частицы требуется три числа для положения и три для скорости, в итоге получаем $6N$ -мерное фазовое пространство). Существенный момент состоит в том, что фазовое пространство может быть разбито на такие области, что все точки данной области соответствуют конфигурациям скоростей и координат молекул, которые дают одинаковые макроскопические свойства всей системы. Если конфигурация молекул изменилась от одной точки в данной области фазового пространства к другой точке той же области, макроскопические свойства системы не изменятся. Теперь, вместо того чтобы пересчитывать число точек в данной области, — самая прямая аналогия подсчёта числа различных перестановок страниц, но которая, несомненно, привела бы к бесконечному результату, — физики определяют энтропию в терминах объёма каждой области в фазовом пространстве. Большой объём означает больше точек, а потому большую энтропию. А объём области, даже области в многомерном пространстве, есть нечто, чему можно дать строгое математическое определение. (С математической точки зрения необходимо выбрать нечто, именуемое мерой, и для склонного к математике читателя я замечу, что мы обычно выбираем меру, которая однородна по всем микросостояниям, совместимым с данным макросостоянием, — т. е.

каждая микроскопическая конфигурация, связанная с данным набором макроскопических свойств, предполагается равновероятной.)

В частности, мы знаем один путь, на котором это может произойти: если несколькими днями ранее молекулы CO_2 были в бутылке, тогда мы знаем из нашего обсуждения выше, что если сейчас вы одновременно замените на противоположные скорости всех молекул CO_2 , а также каждой молекулы или атома, которые любым образом взаимодействовали с молекулами CO_2 , и подождёте те же несколько дней, молекулы соберутся назад в бутылку. Но это обращение скорости — не та вещь, которую можно исполнить на практике, однако это может произойти по их собственному согласию. Я должен заметить, что это было доказано математически: если вы ждёте достаточно долго, то молекулы CO_2 по своей собственной воле обязательно снова соберутся в бутылку. Результат, доказанный в 1800-е гг. французским математиком Жозе Лиувиллем, можно использовать для доказательства того, что известно как теорема о возвращении Пуанкаре. Эта теорема показывает, что если вы достаточно долго ждёте, то система с конечной энергией и ограниченная конечным пространственным объёмом (вроде молекул CO_2 в закрытом помещении) будет возвращаться в состояние, как угодно близкое к её начальному состоянию (в нашем случае все молекулы CO_2 соберутся в бутылке колы). Загвоздка в том, как долго вам придётся ждать, чтобы это случилось. Для систем с любым, даже малым числом составляющих теорема показывает, что вы, как правило, будете ждать намного дольше возраста Вселенной, пока составляющие по своему собственному согласию перегруппируются в их начальную конфигурацию. Тем не менее, с принципиальной точки зрения, интересно отметить, что любая пространственно ограниченная физическая система при бесконечном терпении и долговечности будет возвращаться к своей начальной конфигурации.

Вы можете удивиться тогда, почему вода вообще превращается в лёд, ведь это приводит к тому, что молекулы H_2O становятся более упорядоченными, что означает переход к меньшей, а не большей, энтропии. Грубый ответ состоит в том, что когда жидкая вода превращается в твёрдый лёд, она отдаёт энергию в окружающую среду (в противоположность тому, что происходит, когда лёд тает, когда он забирает энергию из окружения), а это повышает энтропию окружающей среды. При достаточно низких температурах окружения, т. е. ниже 0°C , рост энтропии окружающей среды превосходит уменьшение энтропии воды, так что замерзание становится предпочтительным с точки зрения энтропии. Вот почему холодной зимой получается лёд. Аналогично, когда кубики льда формируются в морозильнике вашего холодильника, их энтропия уменьшается, но сам холодильник накачивает тепло в окружающую среду, и если принять это во внимание, получим, что общая энтропия возрастает. Более точный ответ для склонного к математике читателя заключается в том, что спонтанные явления такого вида управляются тем, что известно как свободная энергия. Интуитивно свободная энергия есть та часть энергии системы, которая может быть использована для совершения работы. Математически свободная энергия F определяется соотношением $F = U - TS$, где U обозначает полную энергию, T — температуру, а S — энтропию. Система будет склонна к спонтанному изменению, если это приводит к уменьшению её свободной энергии. При низких температурах уменьшение U , связанное с превращением жидкой воды в твёрдый лёд, перевешивает уменьшение S (перевешивает возрастание $-TS$), поэтому переход будет происходить.

По поводу более раннего обсуждения того, как прямое применение энтропийных рассуждений может приводить к заключению, что память и исторические записи не являются достоверными оценками прошлого, см.: Weizsaeker C. F. von. in *The Unity of Nature*. New York: Farrar, Straus, and Giroux, 1980. P. 138–46 (первоначально опубликовано в *Annalen der Physik*. 1939. № 36). По поводу превосходной недавней дискуссии см.: Albert D. in *Time and Chance*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2000.

Фактически, поскольку законы физики не различают направления вперёд и назад во времени, объяснение полностью сформированных кубиков льда получасом раньше, в 10:00 вечера, будет точно в той же степени абсурдным (говоря на языке энтропии), как и предсказание, что на полчаса позже, в 11:00 вечера, маленькие кусочки льда вырастут в полностью сформированные кубики льда. Напротив, объяснение, что в 10:00 вечера была жидкая вода, из которой медленно формируются маленькие кусочки льда к 10:30 вечера, является ровно столь же осмысленным, как и предсказание, что в 11:00 вечера маленькие кусочки льда растают в жидкую воду, что является привычным и полностью ожидаемым. Это последнее объяснение с точки зрения наблюдения в 10:30 вечера является совершенно симметричным во времени и, более того, согласуется с последующими наблюдениями.

Особенно внимательный читатель может подумать, что фразой «специфическое прошлое» я внёс необъективность, поскольку тем самым ввёл временную асимметрию. Выражаясь более точно, я имел в виду, что нужны специальные условия, преобладающие (по крайней мере) на одном из концов временного измерения. Как станет ясно, специальные условия означают граничное условие низкой энтропии, и я буду называть «прошлым» направление, в котором это условие выполняется.

Идея, что стрела времени требует низкоэнтропийного прошлого, имеет долгую историю, восходя к Больцману и другим; она обсуждалась в некоторых деталях в книге: *Рейхенбах Г.* Направление времени. М.: URSS, 2003. и отстаивалась особенно интересным количественным методом в книге: *Пенроуз Р.* Новый ум короля. М.: URSS, 2008. С. 293–297.

Вспомним, что наше обсуждение в этой главе не принимает во внимание квантовую механику. Как показал Стивен Хокинг в 1970-е гг., когда рассматриваются квантовые эффекты, чёрные дыры позволяют некоторому количеству радиации просачиваться наружу, но это не влияет на их статус самых высокоэнтропийных объектов в космосе.

Естественный вопрос заключается в том, откуда мы знаем, что не существуют некоторые будущие ограничения, которые также имеют влияние на энтропию. По правде говоря, мы этого не знаем, и некоторые физики даже предлагали эксперименты, чтобы обнаружить возможное влияние, которое такие будущие ограничения могли бы оказывать на вещи, которые мы можем наблюдать сегодня. Интересная статья, обсуждающая возможность будущих и прошлых ограничений на энтропию, — Gell-Mann M. and Hartle J. Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology, in *Physical Origins of Time Asymmetry*. J. J. Halliwell, J. Perez-Mercader, W. H. Zurek, eds. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1996, а также другие статьи в частях 4 и 5 этого сборника.

На протяжении этой главы мы говорили о стреле времени, ссылаясь на очевидный факт, что имеется асимметрия вдоль оси времени (оси времени любого наблюдателя) пространства-времени: гигантское разнообразие последовательностей событий выстраивается в одном порядке вдоль оси времени, но обратное упорядочение таких событий появляется редко, если вообще появляется. На протяжении многих лет физики и философы делили эти последовательности событий на подкатегории, для которых временная асимметрия может, в принципе, быть объяснена логически независимым образом. Например, тепло перетекает от горячих объектов к более холодным, но не от холодных объектов к горячим; электромагнитные волны испускаются наружу из источников вроде звёзд и электрических лампочек, но, кажется, никогда не собираются внутрь таких источников; Вселенная выглядит однородно расширяющейся, но не сжимающейся; и мы помним прошлое, но не будущее (это называется, соответственно, термодинамической, электромагнитной, космологической и психологической стрелой времени). Все эти явления асимметричны во времени, но они могут, в принципе, получать свою временную асимметрию благодаря совершенно разным физическим принципам. Моя точка зрения, которую многие разделяют (но другие — нет), состоит в том, что, исключая, возможно, космологическую стрелу времени, эти явления временной асимметрии фундаментально не отличаются и, в конце концов, поддаются одинаковому объяснению — которое мы описываем в этой главе. Например, почему электромагнитное излучение распространяется в виде расходящихся волн, но не в виде сходящихся волн, хотя оба вида волн являются совершенно правильными решениями уравнений электромагнетизма Максвелла? Да потому, что наша Вселенная имеет низкоэнтропийные, когерентные, упорядоченные источники таких расходящихся волн — звёзды и электрические лампочки, например, — и существование этих упорядоченных источников является результатом ещё более упорядоченного окружения в отправной точке Вселенной, как обсуждается в тексте. Психологическая стрела времени труднее для понимания, поскольку тут очень многое связано с микропсихическими основами человеческого мышления, которые нам ещё предстоит понять. Но большой прогресс в понимании стрелы времени имеет место в её отношении к компьютерам — выполнение и завершение вычислений,

запись результатов есть основная вычислительная последовательность, энтропийные свойства которой хорошо поняты (в работах Чарльза Беннета, Рольфа Ландауера и др.) и тесно связаны со вторым началом термодинамики. Таким образом, если человеческое мышление может быть связано с вычислительным процессом, то может быть применено и сходное термодинамическое объяснение. Отметим также, что асимметрия, связанная с тем фактом, что Вселенная расширяется, а не сжимается, связана со стрелой времени, которую мы исследовали, но логически отличается от неё. Если расширение Вселенной замедлится, остановится, а затем повернёт к сжатию, стрела времени всё ещё будет указывать в том же направлении. Физические процессы (разбивание яиц, старение людей и т. д.) всё ещё будут происходить в обычном направлении, даже если расширение Вселенной сменится сжатием.

Для склонного к математике читателя отметим, что, когда мы делаем такой вид вероятностного утверждения, мы предполагаем особую меру вероятности: такую, которая однородна относительно всех микросостояний, совместимых с тем, что мы видим прямо сейчас. Имеются, конечно, другие меры, которые можно было бы использовать. Например, Дэвид Альберт (Albert D. в *Time and Chance*) отстаивает использование вероятностной меры, которая однородна по всем микросостояниям, совместимым с тем, что мы видим сейчас, и с тем, что он называет гипотезой о прошлом, — с очевидным фактом, что Вселенная началась с низкоэнтропийного состояния. Используя эту меру, мы удаляем из рассмотрения все истории, кроме тех, которые совместимы с низкоэнтропийным прошлым, подтверждаемым нашей памятью, записями и космологическими теориями. При таком способе мышления вероятностной загадки по поводу Вселенной с низкой энтропией нет; Вселенная начала этот путь, по предположению, с вероятностью 1. Остаётся, правда, всё та же гигантская головоломка, почему она начала таким образом, хотя это и не озвучивается явно в вероятностном контексте.

Вы можете попытаться объяснить, что известная Вселенная имела сначала низкую энтропию просто потому, что она была намного меньше по размеру, чем сегодня, а потому — подобно книге с несколькими страницами — допускала намного меньше перестановок своих составляющих. Но для неё самой этот фокус не проходит. Даже маленькая Вселенная может иметь гигантскую энтропию. Например, одна из возможных (хотя маловероятных) судеб для нашей Вселенной заключается в том, что текущее расширение однажды остановится, повернётся, и Вселенная станет сжиматься, закончив в так называемом Большом сжатии. Расчёты показывают, что хотя размер Вселенной уменьшается во время фазы сжатия, энтропия будет продолжать расти, а, это означает, что малый размер не гарантирует малой энтропии. Однако в главе 11 мы увидим, что малый начальный размер Вселенной на самом деле играет важную роль в том наилучшем объяснении низкоэнтропийного начала, которое имеется на настоящий момент.

Хорошо известно, что уравнения классической физики не могут быть решены точно, если вы изучаете движение трёх или более взаимодействующих тел. Так что даже в классической физике любые реальные предсказания о движении большого набора частиц будут с неизбежностью приближительными. Суть, однако, в том, что тут не имеется фундаментального предела, насколько точным может быть это приближение. Если бы мир управлялся классической физикой, тогда с помощью всё более мощных компьютеров и задания всё более точных начальных данных для положений и скоростей мы могли бы подобраться всё ближе к точному ответу.

В конце главы 4 отмечено, что результат Белла, Аспекта и других не исключает возможности, что частицы всегда имеют определённые положения и скорости, хотя мы никогда не можем определить такие свойства одновременно. Более того, версия квантовой механики Бома явно реализует такую возможность. Таким образом, хотя широко распространённое мнение, что электрон не имеет положения до измерения, является стандартной особенностью общепринятого подхода к квантовой механике, но, строго говоря, это слишком сильно для общего утверждения. Обратим внимание, однако, что в подходе Бома, как мы будем обсуждать далее в этой главе, частицы «сопровождаются» вероятностными волнами; т. е. теория Бома всегда привлекает частицы *и* волны, тогда как стандартный подход демонстрирует дополненность, которая, грубо говоря, означает частицы *или* волны. Таким образом, заключение, к которому мы приходим, — что квантово-механическое описание прошлого было бы совершенно неполным, если бы мы говорили исключительно о частицах, проходящих через единственную точку пространства в каждый определённый момент времени (что мы бы делали в классической физике), — тем не менее остаётся верным. В обычной квантовой механике мы обязаны включить все возможные другие положения, которые частица могла бы занимать в любой данный момент, тогда как в подходе Бома мы должны также включить «волну-пилот» — объект, который также распределён по всем возможным положениям. (Подготовленный читатель должен заметить, что волна-пилот есть просто волновая функция обычной квантовой механики, хотя её воплощение в теории Бома несколько отличается.) Чтобы избежать бесконечных оговорок, последующую дискуссию будем проводить с точки зрения обычной квантовой механики (более широко используемого подхода), оставив ссылки на подход Бома и другие подходы до последнего раздела главы.

Для математизированного, но на очень высоком педагогическом уровне, изложения теории интеграла по путям (суммирования по историям) см.: *Фейнман Р., Хибс А.* Квантовая механика и интегралы по траекториям. М.: Мир, 1968.

Вы можете попытаться привлечь дискуссию главы 3, в которой мы узнали, что при достижении скорости света время останавливается, чтобы доказать, что с точки зрения фотона все моменты времени есть один и тот же момент, так что фотон «знает», как установлен выключатель детектора, когда он проходит через светоделитель. Однако эти эксперименты могут быть проведены и с другими видами частиц, такими как электроны, которые движутся медленнее света, а результаты останутся неизменными. Таким образом, это объяснение не касается сути физики явления.

Экспериментальная установка, а также реально подтверждённые экспериментальные результаты обсуждаются в статье: Kim Y., Yu R., Kulik S., Shih Y., Scully M. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 84. № 1. P. 1–5.

Квантовая механика также может основываться на эквивалентном уравнении, представленном в другой форме Вернером Гейзенбергом в 1925 г. (это представление известно как матричная механика). Для склонного к математике читателя приведём уравнение Шрёдингера:

$$H\Psi(x, t) = i\hbar \left(\frac{d\Psi(x, t)}{dt} \right),$$

где H обозначает гамильтониан, Ψ обозначает волновую функцию, а \hbar есть постоянная Планка.

Подготовленный читатель отметит, что я здесь пропустил одно тонкое место. А именно, нам бы пришлось взять комплексно сопряжённую волновую функцию частицы, чтобы она была решением обращённого во времени уравнения Шрёдингера. Это означает, что описанный в примечании 2 к главе 6 оператор T , действуя на волновую функцию $\Psi(x, t)$, отображает её в $\Psi^*(x, -t)$. Это не влияет существенно на обсуждение в тексте.

Бом на самом деле заново открыл и дальше развил подход, который восходит к принцу Луи де Бройлю, так что этот подход иногда называют подходом де Бройля-Бома.

Для склонного к математике читателя заметим, что подход Бома локален в *конфигурационном* пространстве, но определённо *нелокален* в реальном пространстве. Изменения волновой функции в одном месте в реальном пространстве немедленно оказывают влияние на частицы, расположенные в других, удалённых местах.

Для исключительно ясного обсуждения подхода Жирарди-Римини-Вебера и его применения к пониманию квантового запутывания см.: Bell J. S. Are There Quantum Jumps? in *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1993.

Некоторые физики рассматривают вопросы из этого списка как не относящиеся к делу и являющиеся побочным продуктом ранней путаницы в понимании квантовой механики. Волновая функция, утверждает эта точка зрения, является просто теоретическим средством, чтобы делать (вероятностные) предсказания, и не должна соответствовать никакой, кроме математической, реальности (точка зрения, которую иногда называют подходом «Заткнись и вычисляй», поскольку она поощряет использовать квантовую механику и волновые функции, чтобы делать предсказания, не задумываясь сильно о том, что на самом деле означают и делают волновые функции). Вариант этой точки зрения утверждает, что волновые функции никогда на самом деле не коллапсируют, но что взаимодействия с окружающей средой делают так, что *кажется*, что коллапсируют. (Мы коротко обсудим версию такого подхода.) Я симпатизирую этим идеям и, фактически, очень надеюсь, что рано или поздно мы будем обходиться без услуг понятия коллапса волновой функции. Но я не нахожу первый подход удовлетворительным, также я не готов отказаться от понимания, что происходит в мире, когда мы «не смотрим» на него, а второй подход — при том, что, на мой взгляд, это есть правильное направление, — требует дальнейшей математической разработки. Суть в том, что измерение вызывает нечто, что *есть*, или *похоже на*, или *маскируется под* коллапс волновой функции. Либо через лучшее понимание влияния окружения, либо через некоторые другие подходы, которые ещё должны быть предложены, но этот явный эффект требует рассмотрения, а не просто выбрасывания из головы.

Помимо очевидной экстравагантности, имеются и другие спорные проблемы, связанные с многомировой интерпретацией. Например, имеются технические проблемы в определении понятия вероятности в контексте, в котором имеется бесконечное число копий каждого из наблюдателей, чьи измерения, как предполагается, описываются этими вероятностями. Если данный наблюдатель на самом деле является одной из многих копий, в каком смысле мы можем сказать, что он имеет определённую вероятность измерить этот или тот результат? Кто на самом деле есть этот наблюдатель? Каждая копия наблюдателя будет измерять — с вероятностью 1 — любой результат, какой бы ни был получен для той копии вселенной, в которой он находится, так что полная вероятностная схема требует (и требовала, и продолжает требовать) осторожной проверки в рамках многомировой интерпретации. В качестве более технического замечания заметим, что в зависимости от того, как именно определяются «многие миры», может потребоваться выбор привилегированного базиса собственных состояний. Но как должен быть выбран этот собственный базис? Была масса дискуссий и написано много статей по этим вопросам, но на сегодняшний день нет универсально принимаемого решения. Подход, базирующийся на декогеренции, который тоже далее коротко обсуждается, частично проясняет эти проблемы и предлагает особый взгляд на проблему выбора собственного базиса.

Подход Бома или де Бройля-Бома никогда не привлекал большого внимания. Возможно, одна из причин этого, как обратил внимание Джон Белл в своей статье «The Impossible Pilot Wave» в сборнике «*Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*», что ни де Бройль, ни Бом не испытывали особенно нежных чувств к тому, что сами разработали. Но, как указал всё тот же Белл, подход де Бройля-Бома преодолевает значительную часть неопределённости и субъективности многих стандартных подходов. Даже если подход неверен, всё же полезно иметь в виду, что частица может иметь определённое положение и определённую скорость в каждый момент времени (за пределами возможности их измерить, даже в принципе) и всё же полностью подчиняться предсказаниям стандартной квантовой механики — неопределённости и всему такому. Другой аргумент против подхода Бома состоит в том, что нелокальность в этой схеме более «жёсткая», чем в стандартной квантовой механике. Это означает, что в подходе Бома с самого начала и как центральный элемент теории предполагается нелокальное взаимодействие (между волновой функцией и частицей), тогда как в стандартной квантовой механике нелокальность скрыта более глубоко и появляется только в нелокальных корреляциях между далеко разнесёнными измерениями. Но, как доказывали сторонники подхода Бома, если что-то скрыто, оно от этого не станет присутствовать меньше и, более того, так как стандартный подход имеет проблемы с квантовым измерением — тем самым местом, где нелокальность и проявляется, — однажды, когда проблема будет полностью решена, нелокальность вполне может оказаться и не столь скрытой. Другие доказывали, что имеются препятствия на пути разработки релятивистской версии подхода Бома, хотя прогресс на этом фронте также имеет место (см., например: Bell J. *Beables for Quantum Field Theory* в упомянутом выше сборнике). Так что, определённо, стоит держать этот альтернативный подход в уме, хотя бы только как некое средство против поспешных заключений о том, что должно неизбежно следовать из квантовой механики. Для склонного к математике читателя прекрасное рассмотрение теории Бома и проблем квантового запутывания можно найти в книге: Maudlin T. *Quantum Non-locality and Relativity*. Malden, Mass.: Blackwell, 2002.

Для глубокого, хотя и несколько технического обсуждения стрелы времени в целом и роли декогеренции в частности, см.: Zeh H. D. *The Physical Basis of the Direction of Time*. Heidelberg: Springer, 2001 (см. также интересную, но уже немного устаревшую статью Дитера Цея: Zeh H. D. *Quantum theory and time asymmetry*. arXiv:quant-ph/0307013 — Прим. ред.).

Только для того чтобы дать вам ощущение, как быстро возникает декогеренция — как быстро влияние окружающей среды подавляет квантовую интерференцию и при этом сводит квантовые вероятности к привычным классическим, — приведём несколько примеров. Числа приблизительны, но смысл, который они передают, ясен. Волновая функция частички пыли, плавающей в вашей комнате и бомбардируемой дрожаниями молекул воздуха, станет декогерентной через примерно миллиардную от миллиардной от миллиардной от миллиардной (10^{-36}) доли секунды. Если частичка пыли содержится в совершенной вакуумной камере и взаимодействует только с солнечным светом, её волновая функция будет декогерировать чуть медленнее, требуя тысячную от миллиардной от миллиардной (10^{-21}) доли секунды. А если частичка пыли плавает в тёмных глубинах пустого пространства и взаимодействует только с реликтовыми микроволновыми фотонами Большого взрыва, её волновая функция станет декогерентной примерно за миллионную долю секунды. Эти числа экстремально малы, а это показывает, что декогеренция для чего-то даже столь крохотного, как частица пыли, происходит очень быстро. Для более крупных объектов декогеренция происходит ещё быстрее. Потому неудивительно, что хотя наша Вселенная и квантовая, мир вокруг нас выглядит так, как он выглядит (см., например: Joos E. *Elements of Environmental Decoherence*, in *Decoherence: Theoretical, Experimental, and Conceptual Problems*. Ph. Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, I.-O. Stamatescu, eds. Berlin: Springer, 2000).

Точнее, симметрия между законами в Коннектикуте и законами в Нью-Йорке использует *как* трансляционную симметрию, *так и* вращательную симметрию. Когда вы выступаете в Нью-Йорке, вы не только изменили своё положение по сравнению с Коннектикутом, но и, скорее всего, вы осуществили ваше выступление в некотором ином направлении (например, запад вместо севера), чем во время подготовки.

Законы движения Ньютона обычно описываются как применимые для «инерциальных наблюдателей», но если внимательно посмотреть, как такие наблюдатели определяются, получается порочный круг: «инерциальные наблюдатели» — это те наблюдатели, для которых выполняются законы Ньютона. Хорошей областью для размышлений о том, что на самом деле происходит, является то, что законы Ньютона обращают наше внимание на широкий и особенно удобный класс наблюдателей: те, которые описывают движение полностью в соответствии с ньютоновской схемой. По определению, это и есть «инерциальные наблюдатели». На практике «инерциальные наблюдатели» — это те, на которых не действуют никакие силы, т. е. наблюдатели, которые не испытывают ускорения. Общая теория относительности Эйнштейна, напротив, применима ко всем наблюдателям, независимо от состояния их движения.

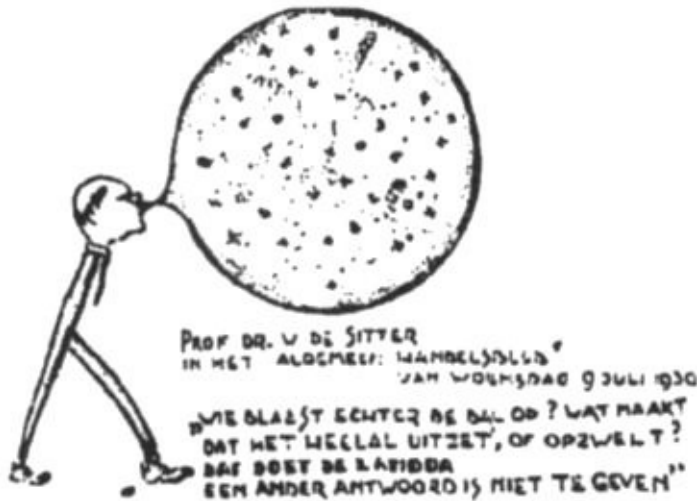
Если бы мы жили в эпоху, в течение которой все изменения были бы остановлены, мы бы не ощущали течения времени (все функции тела и мозга должны были бы быть также заморожены). Но означало ли это, что пространственно-временной блок на рис. 5.1 закончился, или, напротив, он продолжался бы без изменений вдоль оси времени (т. е. закончилось ли время или всё ещё существует в некотором формальном, обобщённом смысле), — гипотетический вопрос, на который и ответить трудно и который в значительной степени не имеет отношения к чему-либо, что мы можем измерить или ощутить. Заметим, что эта гипотетическая ситуация отличается от состояния максимального беспорядка, в котором энтропия не может больше расти, но микроскопические изменения вроде движения молекул газа туда-сюда всё ещё имеют место.

Космическое микроволновое излучение было открыто в 1964 г. учёными из Лаборатории Белла Арно Пензиасом и Робертом Вильсоном во время тестирования большой антенны, предназначенной для связи со спутниками. Фонový шум, с которым столкнулись Пензиас и Вильсон, оказалось невозможным удалить (даже после того как они вычистили птичий помёт — «белый шум» — из внутренностей антенны), и благодаря ключевому прозрению Роберта Дике из Принстона и его студентов Петера Ролла и Дэвида Вилинсона, вместе с Джимом Пиблсом, в конце концов было понято, что антенна улавливала микроволновое излучение, которое произвёл Большой взрыв. (Важная работа в космологии, которая послужила основой для этого открытия, была выполнена раньше Георгием Гамовым, Ральфом Алфером и Робертом Германом). Как мы обсудим в последующих главах, фоновая радиация даёт нам подлинную картину Вселенной, когда ей было около 300 000 лет. В это время электрически заряженные частицы вроде электронов и протонов, сильно поглощавшие свет, объединились, сформировав электрически нейтральные атомы, которые, в общем, позволили свету путешествовать почти свободно. С тех самых пор этот древний свет — произведённый на ранних этапах жизни Вселенной — путешествовал беспрепятственно, и сегодня заполняет всё пространство микроволновыми фотонами.

Физическое явление, затронутое здесь, обсуждается в главе 11, и известно как *красное смещение*. Обычные атомы, такие как водород и кислород, испускают свет с длинами волн, которые хорошо известны из лабораторных экспериментов. Когда такие вещества входят в состав галактик, которые уносятся от нас прочь, длина волны испущенного ими света увеличивается, почти как увеличивается длина волны звука сирены полицейского автомобиля, который уносится прочь, приводя к понижению тона сирены. Поскольку красный свет — это свет с наибольшей длиной волны, который может быть виден невооружённым глазом, это растяжение света называется красным смещением. Величина красного смещения растёт с ростом скорости убегания, а потому, измеряя длины волн зарегистрированного света и сравнивая их с лабораторными результатами, можно определить скорость удалённого объекта. (На самом деле это один из видов красного смещения, он известен как эффект Доплера. Красное смещение может быть также вызвано гравитацией: длина волны фотонов увеличивается, когда они выкарабкиваются из гравитационного поля.)

Более точно, как отметит склонный к математике читатель, что частица массы m , находящаяся на поверхности шара радиуса R с плотностью массы ρ , ощущает ускорение d^2R/dt^2 , равное $(4\pi/3)R^3G\rho/R^2$, так что $(1/R)d^2R/dt^2 = (4\pi/3)G\rho$. Если мы формально отождествим R с радиусом Вселенной, а ρ с плотностью массы Вселенной, это будет уравнение Эйнштейна для эволюции размера Вселенной (в предположении отсутствия давления).

См.: Peebles P. J. E. *Principles of Physical Cosmology*. Princeton: Princeton University Press, 1993. 3. 81.



Надпись гласит: «Но кто на самом деле надувает этот мяч? Из-за чего Вселенная расширяется или раздувается? Эту работу делает Лямбда! Другой ответ не может быть дан». Лямбда обозначает нечто, известное как космологическая постоянная, — идея, с которой мы встретимся в главе 10.

Чтобы избежать путаницы, позвольте мне заметить, что недостатком модели с монеткой является то, что каждая монетка, по существу, идентична любой другой, тогда как это определённо не верно для галактик. Но дело в том, что на самых больших масштабах — порядка 100 млн световых лет — индивидуальные отличия между галактиками, как считается, усредняются, так что, когда мы анализируем гигантские объёмы пространства, общие свойства каждого такого объёма чрезвычайно похожи на свойства любого другого такого объёма.

Вы могли бы путешествовать прямо по внешнему краю чёрной дыры и оставаться там, включив двигатели, чтобы избежать падения в неё. Сильное гравитационное поле чёрной дыры проявляется как сильная деформация пространства-времени, что приводит к тому, что ваши часы будут идти намного медленнее, чем в более обычном положении в галактике (в относительно пустом пространстве). Снова продолжительность времени, измеренная по вашим часам, совершенно правильна. Но, как и при замедлении времени при высокой скорости, это полностью индивидуальная точка зрения. Когда мы анализируем свойства Вселенной как целого, куда удобнее иметь более широко применимое и согласованное понятие истёкшего времени, и это обеспечивается часами, которые двигаются вместе с космическим потоком расширения пространства и которые подвергаются действию намного более слабого, более усреднённого гравитационного поля.

Для анализа геометрической формы пространства математики и физики используют количественный подход к описанию кривизны, разработанный в девятнадцатом столетии, который сегодня является частью математической области знаний, известной как дифференциальная геометрия. Один неформальный способ понимания этого способа описания кривизны заключается в изучении треугольников, нарисованных на или в изучаемом пространстве. Если сумма углов треугольника равна 180° , что верно, когда он нарисован на плоской поверхности стола, мы говорим, что пространство плоское. Но если сумма углов больше или меньше 180° , что верно, когда треугольник нарисован на поверхности сферы (сумма углов больше 180°) или на поверхности седла (сумма углов меньше 180°), мы говорим, что поверхность кривая. Это показано на рис. 8.6.

Если бы вы склеили противоположные вертикальные края тора вместе (что разумно сделать, поскольку они отождествлены — когда вы проходите через один край, вы немедленно возникаете на другом), вы бы получили цилиндр. И затем, если бы вы сделали то же самое с верхним и нижним краями (которые теперь будут иметь форму окружностей), вы бы получили бублик. Таким образом, бублик есть другой способ представлять себе тор. Одно усложнение этого представления заключается в том, что бублик уже не выглядит плоским! Однако это действительно так. Используя понятие кривизны, данное в предыдущем примечании, вы найдёте, что все треугольники, нарисованные на поверхности бублика, имеют сумму углов 180° . То, что бублик выглядит кривым, является артефактом того, как мы вложили двумерную поверхность в наш трёхмерный мир. По этой причине в текущем контексте более удобно использовать явно плоские представления двух- и трёхмерных торов, как это обсуждается в тексте.

Отметим, что мы весьма вольно разграничили понятия формы поверхности и кривизны. Имеются три типа кривизны для полностью симметричного пространства: положительная, нулевая и отрицательная. Но две поверхности могут иметь одинаковую кривизну и всё же не быть идентичными по форме; простейшим примером является плоский видеоэкран и плоская бесконечная поверхность стола. Таким образом, симметрия позволяет нам свести кривизну пространства к трём возможностям, но имеются в некотором смысле больше чем три формы пространства (отличающиеся тем, что математики называют глобальными свойствами), которые реализуют эти три кривизны.

До настоящего момента мы концентрировались исключительно на кривизне трёхмерного пространства — кривизне пространственных сечений в блоке пространства-времени. Однако, хотя это трудно нарисовать, во всех трёх случаях пространственной кривизны (положительной, нулевой, отрицательной) искривлено всё четырёхмерное пространство-время, причём со степенью кривизны тем большей, чем ближе мы подходим к Большому взрыву. Фактически, вблизи момента Большого взрыва четырёхмерная кривизна пространства-времени возрастает настолько, что уравнения Эйнштейна отказывают. Мы обсудим это далее в последующих главах.

Если вы повысите температуру много больше, то получите четвёртое состояние материи, известное как *плазма*, в котором атомы разрушаются на составляющие частицы.

Имеются любопытные вещества, такие как соли Рошелле, которые становятся менее симметричными при высоких температурах и более симметричными при низких температурах — противоположно тому, что мы, как правило, ожидаем.

Одно различие между полями сил и материи выражается *принципом исключения* Вольфганга Паули. Этот принцип показывает, что, в то время как огромное количество частиц — переносчиков сил (вроде фотонов) могут объединяться, чтобы создать поля, понятные доквантовому физику, такому как Максвелл, — такие поля, которые вы видите всякий раз, когда заходите в тёмную комнату и включаете свет, но частицам материи в общем случае законы квантовой физики запрещают такое кооперирование согласованным, организованным способом. (Более точно, две частицы одного и того же типа, такие как два электрона, не могут иметь одинаковое состояние, тогда как для фотонов такого ограничения нет. Из-за этого поля материи в общем случае не имеют макроскопического, классического проявления.)

В схеме квантовой теории поля каждая известная частица выглядит как возбуждение определённого фундаментального поля, связанного с семейством, членом которого является частица. Фотоны есть возбуждения фотонного поля — т. е. электромагнитного поля; u -кварк является возбуждением поля u -кварков; электрон есть возбуждение электронного поля и т. д. Таким образом, вся материя и все силы описываются единым квантово-механическим языком. Однако оказалось, что очень трудно описать на этом языке все квантовые свойства гравитации, эту проблему мы будем рассматривать в главе 12.

Хотя поле Хиггса названо в честь Петера Хиггса, но жизненно важную роль в его появлении в физике и в его теоретическом исследовании сыграло большое число других физиков, среди них — Томас Киббл, Филип Андерсон, Роберт Браут и Франсуа Энглер.

Имейте в виду, что *величина* поля задаётся расстоянием от него до центра чаши, так что хотя поле имеет нулевую *энергию*, когда его величина находится в жёлобе чаши (поскольку высота над дном жёлоба обозначает энергию поля), его величина не равна нулю.

В принципе, имеются два понятия массы, которые фигурируют в физике. Одно понятие описано в тексте: масса есть свойство объекта, определяющее его способность сопротивляться ускорению. Иногда эту массу называют *инертной* массой. Второе понятие массы имеет отношение к гравитации: масса, как такое свойство объекта, которое определяет, насколько сильно он будет притягиваться гравитационным полем заданной величины (таким как поле Земли). Иногда это понятие массы называется *гравитационной* массой. На первый взгляд, поле Хиггса имеет отношение только к пониманию инертной массы. Однако принцип эквивалентности общей теории относительности утверждает, что силы, ощущаемые от ускоренного движения и от гравитационного поля, неразличимы — они эквивалентны. А это означает эквивалентность понятий инертной и гравитационной массы. Таким образом, поле Хиггса имеет отношение к обоим видам массы, которые мы упомянули, поскольку, согласно Эйнштейну, они представляют собой одно и то же.

Я благодарю Рафаэля Каспера, который указал, что это описание является вариацией победной метафоры профессора Дэвида Миллера, предъявленной в 1993 г. в ответ на требование Британского министра науки Вильяма Вальдегрейва Британскому физическому обществу объяснить, почему деньги налогоплательщиков должны быть использованы на поиски частицы Хиггса.

Склонный к математике читатель должен отметить, что фотоны, W -, и Z -бозоны описываются в электрослабой теории как принадлежащие к присоединённому представлению группы $SU(2) \times U(1)$, а потому преобразовываются под действием этой группы. Более того, уравнения электрослабой теории полностью симметричны относительно преобразований этой группы, и в этом смысле мы описываем частицы сил как взаимосвязанные. Более точно, в электрослабой теории фотон является определённой смесью калибровочного бозона, проявляющего явную $U(1)$ -симметрию, и $U(1)$ -подгруппы группы $SU(2)$; таким образом, он тесно связан со слабыми калибровочными бозонами. Однако вследствие структуры группы, имеющей вид произведения двух групп, четыре бозона (на самом деле имеются два W -бозона с противоположными электрическими зарядами) не полностью смешиваются под её действием. В этом смысле слабое и электромагнитное взаимодействия являются частью единой математической структуры, но не настолько сильно унифицированы, как это могло бы быть. Если включить ещё и сильные взаимодействия, группа пополняется путём включения множителя $SU(3)$ — «цветная группа» $SU(3)$ — и тогда эта группа, имея три независимых сомножителя, $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, только ещё раз подчёркивает отсутствие полного объединения. Такова часть мотивировки великого объединения, обсуждаемого в следующем разделе: великое объединение ищет единственную, полупростую группу Ли — группу, состоящую из единственного сомножителя, — которая описывает силы на больших масштабах энергии.

Склонный к математике читатель должен заметить, что великая теория объединения Джорджи и Глэшоу базировалась на группе $SU(5)$, которая включала $SU(3)$, группу, ассоциирующуюся с сильным ядерным взаимодействием, а также $SU(2) \times U(1)$, группу, ассоциирующуюся с электрослабым взаимодействием. В дальнейшем физики изучали следствия других потенциальных групп великого объединения, таких как $SO(10)$ и E_6 .

Как мы видели, сам Большой взрыв не произошёл в определённом месте предсуществующего пространства, вот почему мы также не спрашиваем, где он взорвался. Шутливое описание неполноценности Большого взрыва, которое мы использовали, принадлежит Алану Гуту; см., например, его книгу: Guth A. *The Inflationary Universe*. Reading, Eng.: Perseus Books, 1997. P. xiii.

Термин «Большой взрыв» иногда используется для обозначения события, которое само произошло в момент времени «нуль», приведя Вселенную к существованию. Но поскольку, как мы будем обсуждать в следующей главе, уравнения общей теории относительности в момент «нуль» не работают, никто не имеет никакого понятия, чем на самом деле было это событие. Этот пробел мы и имеем в виду, когда говорим, что теория Большого взрыва не включает в себя взрыв. В этой главе мы ограничимся ситуациями, в которых уравнения не отказывают. Инфляционная космология использует такие хорошо ведущие себя уравнения, чтобы описать быстрое взрывное раздувание пространства, которое мы естественно рассматриваем как взрыв, не описываемый самой теорией Большого взрыва. Однако этот подход определённо оставляет без ответа вопрос о том, что происходило в начальный момент создания Вселенной — если действительно был такой момент.

Pais A. *Subtle Is the Lord*. Oxford: Oxford University Press, 1982. P. 253
(рус. пер. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.:
Наука, 1989. С. 245).

Отметим для склонного к математике читателя: Эйнштейн заменил исходное уравнение

$$G_{\mu\nu} = \left(\frac{8\pi G}{c^4} \right) T_{\mu\nu}$$

на

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \left(\frac{8\pi G}{c^4} \right) T_{\mu\nu},$$

где Λ есть число, обозначающее величину космологической постоянной.

Когда я в этом контексте обращаюсь к массе объекта, я ссылаюсь на сумму полных масс его отдельных составляющих. Если, скажем, кубик состоит из 1000 атомов золота, мне надо бы говорить о 1000 масс одного такого атома. Это определение согласуется с точкой зрения Ньютона. Законы Ньютона говорят, что такой кубик будет иметь массу в 1000 раз больше массы отдельного атома золота и что он будет весить в 1000 раз больше, чем отдельный атом золота. В соответствии с Эйнштейном, однако, вес кубика зависит также от кинетической энергии атомов (так же как и всех других вкладов в энергию кубика). Это следует из соотношения $E = mc^2$: бо́льшая энергия (E), безотносительно к её источнику, транслируется в бо́льшую массу (m). Таким образом, эквивалентный способ выражения сути дела состоит в том, что, поскольку Ньютон не знал о формуле $E = mc^2$, его закон гравитации использовал определение массы, которое не учитывает различные вклады в энергию, такие как энергия, связанная с движением.

Данное обсуждение намекает на лежащую в основе физику, но не охватывает её полностью. Давление, оказываемое сжатой пружиной, на самом деле влияет на то, насколько сильно коробка притягивается к Земле. Но это происходит потому, что сжатая пружина влияет на полную энергию коробки, и, как обсуждалось в предыдущем абзаце, в соответствии с общей теорией относительности, полная энергия — это именно то, что имеет отношение к делу. Однако я здесь подчёркиваю, что само давление — не только благодаря вкладу, который оно вносит в полную энергию, — генерирует гравитацию, почти как это делают масса и энергия. В соответствии с общей теорией относительности давление гравитирует. Также заметим, что отталкивающая гравитация, на которую мы ссылаемся, является *внутренним* гравитационным полем, ощущаемым внутри области пространства, заполненного чем-то, что имеет отрицательное, а не положительное, давление. В такой ситуации отрицательное давление будет давать вклад в отталкивающее гравитационное поле, действующее *внутри* области.

Математически космологическая постоянная представляется числом, обычно обозначаемым Λ (см. примечание [{127}](#)). Эйнштейн обнаружил, что его уравнения являются вполне осмысленными независимо от того, выбрана ли Λ положительным или отрицательным числом. Обсуждение в тексте сосредоточено на особенно интересном для современной космологии (и современных наблюдений) случае, в котором Λ положительна, поскольку это приводит к появлению отрицательного давления и отталкивающей гравитации. Отрицательная величина Λ даёт обычную притягивающую гравитацию. Отметим ещё, что поскольку давление, оказываемое космологической постоянной, однородно, это давление непосредственно не создаёт какую-либо силу: только разности давлений, подобные тому, что чувствуют ваши уши, когда вы погружаетесь под воду, приводят к силам давления. В отличие от этого сила, оказываемая космологической постоянной, есть чисто гравитационная сила.

Обычные магниты всегда имеют как северный, так и южный полюса. Из теорий же великого объединения следует, что могут существовать частицы, которые подобны чистому северному или чистому южному магнитным полюсам. Такие частицы называются монополями и они могли бы иметь большое влияние на стандартную космологию Большого взрыва. Они никогда не наблюдались.

Гут и Тай обнаружили, что переохлаждённое поле Хиггса будет действовать как космологическая постоянная, открытие, которое было сделано ранее Мартинусом Вельтманом и другими. Фактически, Тай говорил мне, что если бы не ограничение по числу страниц в журнале *Physical Review Letters*, в который они с Гуттом послали свою статью, они не выкинули бы заключительное предложение о том, что следствием их модели должен бы быть период экспоненциального расширения Вселенной. Но Тай также заметил, что осознание важности космологических последствий периода экспоненциального расширения (что будет обсуждаться позже в этой и следующей главе) и, следовательно, помещение инфляции в центр обсуждения космологов было достижением Гута.

Как иногда бывает в извилистой истории открытий, несколькими годами ранее советский физик Алексей Старобинский нашёл другой способ генерирования того, что мы сейчас называем инфляционным расширением, в работе, которая не была широко известна среди западных учёных. Однако Старобинский не подчеркнул, что период такого быстрого расширения мог бы решить ключевые космологические проблемы (такие как проблемы горизонта и плоскостности), что объясняет частично, почему его работа не вызвала такого восторженного отклика, который получил Гут. В 1981 г. японский физик Катсухико Сато также разработала версию инфляционной космологии, и даже ещё раньше (в 1978 г.) советские физики Геннадий Чибисов и Андрей Линде наткнулись на идею инфляции, но они обнаружили — когда разобрались в деталях, — что она сталкивается с принципиальными трудностями (обсуждающимися в примечании 11), и потому не стали публиковать свою работу.

Для склонного к математике читателя следует заметить, что нетрудно увидеть, как возникает ускоренное расширение. Одно из уравнений Эйнштейна есть

$$\left(\frac{d^2 a}{dt^2}\right) \frac{1}{a} = \frac{-4\pi G}{3(\rho + 3p)},$$

где a , ρ и p есть масштабный фактор Вселенной (её «размер»), плотность энергии и давление соответственно. Заметим, что если правая сторона этого уравнения положительна, масштабный фактор будет расти с возрастающим темпом: скорость роста Вселенной будет увеличиваться со временем. Для поля Хиггса, застрявшего на плато, его давление оказывается равным плотности его энергии со знаком минус (то же самое справедливо для космологической постоянной), так что правая сторона и в самом деле положительна.

Физика, лежащая в основе этих квантовых скачков, есть принцип неопределённости, затронутый в главе 4. Я буду явно обсуждать применение квантовой неопределённости к полям в главах 11 и 12, но, забегаю вперёд, кратко отмечу следующее. Величина поля в данной точке пространства и скорость изменения величины поля в этой точке играют для полей такую же роль, какую для частиц играет положение и скорость (импульс). Таким образом, точно так же, как мы никогда не можем знать сразу определённое положение и определённую скорость частицы, поле не может иметь определённую величину и определённую скорость изменения этой величины в любой данной точке пространства. Чем более точно определена величина поля в данный момент времени, тем более неопределённа скорость его изменения — это означает, что тем более вероятно, что величина поля изменится моментом позже. И такое изменение, индуцированное квантовой неопределённостью, это то, что я имею в виду, когда говорю о квантовых скачках величины поля.

Вклад Линде и Альбрехта со Стейнхардтом был безусловно критически важным, поскольку оригинальная модель Гута — сейчас называемая *старой инфляцией* — страдала фатальным пороком. Вспомним, что переохлаждённое поле Хиггса (или в терминологии, которую мы вскоре введём, поле *инфлатона*) имеет величину, которая удерживается на выпуклости его энергетической чаши *однородно* во всём пространстве. Поэтому, когда я описывал, как быстро переохлаждённое поле инфлатона могло бы соскочить к значению, соответствующему наинизшей энергии, нам надо было бы спросить, произойдёт ли этот квантовый скачок везде в пространстве в одно и то же время. А ответ состоит в том, что нет, не произойдёт. Вместо этого, как объяснял Гут, релаксация поля инфлатона к нулевой величине энергии происходит через образование отдельных пузырьков: сначала инфлатон соскакивает к значению поля с нулевой величиной энергии в одной точке пространства, и от этой точки начинает расти пузырёк, стенки которого двигаются со скоростью света и в котором поле инфлатона спадает к нулевой величине энергии по мере продвижения стенки пузырька. Гут представил, что множество таких пузырьков со случайно расположенными центрами в конце концов сольются, что даст Вселенную с нулевой энергией поля инфлатона везде. Однако, как это понимал и сам Гут, проблема в том, что окружающее пузырьки пространство всё ещё заполнено полем инфлатона с ненулевой энергией, так что такие области по-прежнему будут подвержены быстрому инфляционному расширению, которое будет растаскивать пузырьки друг от друга. Поэтому нет гарантии, что растущие пузырьки найдут друг друга и сольются в однородное пространство. Более того, Гут утверждал, что когда поле инфлатона релаксирует к нулевой энергии, энергия поля не теряется, а переходит в обычные частицы материи и излучения, заполняющие Вселенную. Однако чтобы довести модель до соответствия с наблюдениями, это превращение должно было бы давать *однородное* распределение материи и энергии во всём пространстве. В механизме, который предложил Гут, это превращение должно было бы происходить через столкновения стенок пузырьков, но расчёты, проведённые Гутом и Эриком Вайнбергом из Колумбийского университета, а также Стивеном Хокингом, Ианом Моссом и Джоном Стюардом из Кембриджского университета, показали, что итоговое распределение материи и энергии

получается *не* однородным. Таким образом, оригинальная инфляционная модель Гута привела к существенным проблемам в деталях.

Идеи Линде и Альбрехта со Стейнхардтом — теперь называемые *новой инфляцией* — решили эти досадные проблемы. Заменяв форму чаши потенциальной энергии на ту, что показана на рис. 10.2, эти исследователи обнаружили, что инфлатон мог бы релаксировать к значению, соответствующему нулевой энергии, постепенно плавно «скатываясь» с энергетического холма в жёлоб, что не требует квантового скачка, как в оригинальном предложении. И, как показали их расчёты, это несколько более плавное скатывание позволяет инфляционному раздуванию пространства продолжаться достаточно долго, чтобы один отдельный пузырёк легко вырос до таких размеров, чтобы заключить в себе всю наблюдаемую Вселенную. Таким образом, в этом подходе не нужно беспокоиться о слиянии пузырьков. Также важно, что вместо превращения энергии поля инфлатона в обычные частицы и излучения при столкновениях пузырьков, в новом подходе инфлатон реализует это превращение энергии постепенно и однородно во всём пространстве, в процессе, напоминающем трение: по мере того как поле скатывается с энергетического холма — однородно в пространстве, — оно передаёт свою энергию путём «трения» о более привычные поля частиц и излучения (взаимодействуя с ними). Новая инфляция, таким образом, сохраняет все успехи подхода Гута, но оказывается способной решить существенные проблемы, с которыми тот столкнулся.

Примерно через год после большого прогресса, связанного с новой инфляцией, Андрей Линде совершил новый прорыв. Для того чтобы механизм новой инфляции работал, нужно, чтобы одновременно выполнялся ряд ключевых условий: чаша потенциальной энергии должна иметь правильную форму, величина поля инфлатона должна находиться изначально на выпуклости чаши (и, несколько более технический момент, сама величина поля инфлатона должна быть однородна в достаточно большой пространственной области). Хотя в принципе возможно, чтобы Вселенная как-то оказалась в таких условиях, Линде нашёл способ генерации инфляционного взрыва более простым и много более естественным способом. Линде показал, что даже для простой чаши потенциальной энергии, такой как на рис. 9.1а, и даже без точной настройки начальной величины поля инфлатона инфляция всё же легко может иметь место. Идея такова. Представьте, что в очень ранней Вселенной всё было «хаотическим», — например, представьте, что имелось поле инфлатона, величина которого хаотически скакала от одного

значения к другому. В некоторых местах в пространстве его величина могла быть малой, в других местах его величина была средней, а ещё в других местах в пространстве его величина могла быть высокой. В местах, где величина поля была малой или средней, ничего особенно достойного внимания не происходило. Но Линде понял, что нечто потрясающе интересное могло бы иметь место в областях, где полю инфлатона случилось достичь большой величины (даже если область была совсем ничтожной, всего 10^{-33} см в поперечнике). Когда величина поля инфлатона велика — когда поле находится высоко в энергетической чаше на рис. 9.1а, — начинает работать некая разновидность космического трения: поле пытается скатиться к более низкой потенциальной энергии, но его большая величина вызывает тормозящую силу трения, так что поле скатывается очень медленно. Таким образом, величина поля инфлатона должна была оставаться примерно постоянной и (примерно как инфлатон на вершине холма потенциальной энергии в новой инфляции) поле должно было давать примерно постоянный вклад в энергию и в отрицательное давление. И, как мы уже знаем, это те условия, которые требуются, чтобы вызвать взрыв инфляционного расширения. Таким образом, не используя специальную форму энергетической чаши и не требуя специальной конфигурации для поля инфлатона, хаотическая среда ранней Вселенной могла бы естественным образом вызвать инфляционное расширение. Неудивительно, что Линде назвал этот подход *хаотической инфляцией*. Многие физики рассматривают его как наиболее убедительную реализацию инфляционной парадигмы.

Те, кто близко знаком с историей предмета, поймут, что возбуждение по поводу открытия Гута было вызвано тем, что оно давало возможность решить ключевые космологические проблемы, такие как проблемы горизонта и плоскостности, которые мы коротко рассматриваем.

Вы можете поинтересоваться, может ли электрослабое поле Хиггса, или поле Хиггса великого объединения, выполнять двойную работу — играть роль, которую мы описали в главе 9, а также одновременно управлять инфляционным расширением в более ранние времена, до формирования Хиггсова океана. Модели такого типа предлагались, но они обычно страдают от технических проблем. Наиболее убедительные реализации инфляционного расширения привлекают новое поле Хиггса, которое играет роль инфлатона.

См. примечание [{134}](#).

Например, вы можете представлять наш горизонт как гигантскую воображаемую сферу с нами в центре, которая отделяет то, с чем мы могли бы связаться (вещи внутри сферы), от того, с чем мы не смогли бы связаться (вещи вне сферы) за время, прошедшее с Большого взрыва. Сегодня радиус нашей «сферы горизонта» составляет около 14 млрд световых лет; на ранних этапах истории Вселенной радиус сферы был намного меньше, поскольку свет имел меньше времени на распространение. См. также примечание [{223}](#).

Поскольку в этом суть того, как инфляционная космология решает проблему горизонта, чтобы избежать путаницы, позвольте мне выделить ключевой элемент решения. Допустим, однажды ночью вы с вашим другом вышли в поле и стали обмениваться световыми сигналами, включая и выключая электрические фонарики, тогда если вы развернётесь и разбежитесь друг от друга (не имеет значения, с какой скоростью вы это сделаете) — вы *всегда* будете в состоянии потом обмениваться световыми сигналами. Почему? Потому что, чтобы избежать получения света, которым ваш друг светит вслед вам, или чтобы ваш друг мог избежать получения света, который вы посылаете вслед ему, вам надо убегать друг от друга быстрее скорости света, а это невозможно. Тогда как же области пространства, которые были в состоянии обмениваться световыми сигналами в ранней истории Вселенной (а потому, например, могли выровнять свои температуры), теперь оказываются за пределами коммуникативной области друг друга? Как ясно из примера с фонариками, они обязаны были уноситься друг от друга прочь быстрее скорости света. И в самом деле, колоссальное расталкивание отрицательной гравитации во время инфляционной фазы *действительно* заставило каждую область пространства уноситься прочь от любой другой намного быстрее скорости света. Ещё раз, это не входит в противоречие со специальной теорией относительности, поскольку предел скорости, установленный светом, относится к движению через пространство, а не к движению от раздувания самого пространства. Так что новое и важное свойство инфляционной космологии состоит в том, что она предполагает существование короткого периода, в течение которого имеется сверхсветовое расширение пространства.

Заметим, что численная величина критической плотности уменьшается, по мере того как Вселенная расширяется. Но суть в том, что если реальная плотность материи/энергии Вселенной равна критической плотности в один момент времени, она будет уменьшаться в точности тем же образом, и равенство критической плотности сохранится на все времена.

Склонный к математике читатель должен заметить, что во время инфляционной фазы размер нашего космического горизонта оставался фиксированным, в то время как пространство чудовищно раздулось (как можно легко увидеть, выбрав экспоненциальную форму масштабного фактора в примечании [{223}](#)). Именно в этом смысле наша наблюдаемая Вселенная в инфляционной схеме является мельчайшим лоскутком гигантского космоса.

Preston R. *First Light*. New York: Random House Trade Paperbacks, 1996.
P. 118.

Превосходный обзор о тёмной материи на общем уровне см. в книге: Krauss L. *Quintessence: The Mystery of Missing Mass in the Universe*. New York: Basic Books, 2000.

Подготовленный читатель заметит, что я не выделяю разные проблемы, связанные с тёмной материей, которые появляются на разных масштабах наблюдения (галактический, космический), поскольку мой интерес здесь связан только с вкладом тёмной материи в плотность космической массы.

На самом деле имеются некоторые разногласия в отношении того, в этом ли состоит механизм, стоящий за всеми вспышками сверхновых типа Ia (я благодарю Д. Спергеля, обратившего моё внимание на это), но однородность этих событий — которая и нужна нам для обсуждения — имеет прочные наблюдательные основания.

Интересно заметить, что намного раньше результатов по сверхновым провидческие работы Джима Пиблза из Принстона, а также Лоуренса Краусса из Кейс Вестерн (г. Кливленд), Майкла Тернера из университета Чикаго и Гари Стейгмана из Огайо указали, что Вселенная может иметь малую ненулевую космологическую константу. Тогда большинство физиков не приняли это предположение слишком серьёзно, но теперь, с данными по сверхновым, отношение к нему существенно изменилось. Также заметим, что ранее в этой главе мы говорили, что расталкивание от космологической постоянной может описываться полем Хиггса, которое, подобно лягушке на выпуклости, захвачено выше своей конфигурации с минимальной энергией. Так что в то время как космологическая постоянная хорошо описывает результаты наблюдений, более точное утверждение состоит в том, что исследователи сверхновых пришли к выводу, что пространство должно быть заполнено чем-то *подобным* космологической постоянной, что генерирует гравитационное расталкивание. (Имеются сценарии, в которых поле Хиггса могло бы генерировать расталкивание, действующее в течение длительного времени, в противоположность короткому взрыву в ранние моменты инфляционной космологии. Мы обсудим это в главе 14, когда рассмотрим вопрос, действительно ли наблюдательные данные непременно требуют наличия космологической постоянной или всем требованиям могут отвечать некоторые другие идеи, приводящие к сходным явлениям в гравитации). Исследователи часто используют термин «тёмная энергия» в широком смысле для обозначения ингредиента Вселенной, который невидим для глаза, но заставляет любую область пространства отталкиваться от любой другой, вместо того чтобы притягиваться.

Тёмная энергия является наиболее широко принятым объяснением наблюдаемого ускоренного расширения, но выдвигались и другие теории. Например, некоторые предположили, что результаты наблюдений могут быть объяснены, если сила гравитации отклоняется от обычной величины, предсказываемой ньютоновской или эйнштейновской физикой, когда расстояния становятся экстремально большими — космологических масштабов. Другие ещё не верят, что результаты наблюдений действительно показывают космологическое ускорение, и ожидают, что измерения будут проведены с помощью более точных инструментов. Важно держать в уме эти альтернативные идеи, особенно если будущие наблюдения дадут результаты, которые создадут проблемы для существующих объяснений. Но пока имеется широкий консенсус, что теоретические объяснения, описанные в основном тексте, — самые убедительные.

Среди лидеров в описании того, как квантовые флуктуации могли бы приводить к неоднородностям, в ранние 1980-е гг. были Стивен Хокинг, Алексей Старобинский, Алан Гут, Со-Юнг Пи, Джеймс Бардин, Пол Стейнхардт, Майкл Тернер, Вячеслав Муханов и Геннадий Чибисов.

Даже после всего изложенного в основном тексте вы всё ещё можете быть озадачены, как крохотное количество материи/энергии в кусочке инфлатона могло дать гигантское количество материи/энергии, составляющее наблюдаемую Вселенную. Как вы можете получить больше материи/энергии, чем то, с чего вы начали? Как объяснялось в основном тексте, поле инфлатона в силу своего отрицательного давления «добывало» энергию из гравитации. Это означает, что по мере того как энергия в поле инфлатона возрастала, энергия в гравитационном поле уменьшалась. Специальное свойство гравитационного поля, известное со времён Ньютона, состоит в том, что его энергия может становиться сколь угодно отрицательной. Таким образом, гравитация подобна банку, который готов дать займы неограниченное количество денег, — гравитация заключает в себе, по существу, безлимитный ресурс энергии, которую извлекает поле инфлатона во время расширения пространства.

Точные значения массы и размера начального кусочка однородного поля инфлатона зависят от деталей изучаемой модели инфляционной космологии (больше всего от подробностей формы чаши потенциальной энергии поля инфлатона). В тексте я представлял, что начальная плотность энергии поля инфлатона была около 10^{82} г/см³, так что объём $(10^{-26}$ см)³ = 10^{-78} см³ должен был иметь полную массу около 10 кг. Эти величины типичны для вполне обычного класса инфляционных моделей, но предназначены только чтобы дать вам грубое представление о величинах, с которыми приходится иметь дело. Чтобы дать представление о диапазоне возможностей, позвольте мне заметить, что в моделях хаотической инфляции Андрея Линде (см. примечание [{134}](#)) наша наблюдаемая Вселенная могла бы появиться из начального кусочка даже меньшего размера, всего 10^{-33} см в поперечнике (так называемая планковская длина), с более высокой плотностью энергии, около 10^{94} г/см³, что даёт полную массу около 10^{-5} г (так называемая планковская масса). В этой реализации инфляции начальный кусочек должен был весить примерно как частичка пыли.

См.: Davies P. Inflation and Time Asymmetry in the Universe, *Nature*. Vol. 301. P. 398; Page D. Inflation Does Not Explain Time Asymmetry, *Nature*. Vol. 304. P. 39; и Davies P. Inflation in the Universe and Time Asymmetry, *Nature*. Vol. 312. P. 524.

Чтобы объяснить этот существенный момент, удобно разделить энтропию на часть, связанную с пространством-временем и гравитацией, и оставшуюся часть, связанную со всем остальным, поскольку это на интуитивном уровне отражает ключевые идеи. Однако я должен заметить, что попытка дать математически строгую трактовку, в которой гравитационный вклад в энтропию аккуратно идентифицирован, выделен и учтён, является иллюзорной. Тем не менее это не умаляет качественные заключения, которых мы достигли. На самом деле вся дискуссия может быть перефразирована почти совершенно без ссылки на гравитационную энтропию. Как мы подчёркивали в главе 6, когда существенна обычная притягивающая гравитация, материя собирается в сгущения. В этом процессе материя преобразует гравитационную потенциальную энергию в кинетическую энергию, которая затем частично преобразуется в излучение, уходящее из сгустка. Это представляет собой последовательность событий с возрастанием энтропии (большие средние скорости частиц увеличивают соответствующий объём фазового пространства; производство излучения во взаимодействиях увеличивает общее число частиц — то и другое повышает общую энтропию). Таким образом, то, на что в тексте мы ссылались как на *гравитационную энтропию*, может быть перефразировано как *энтропия материи, генерируемая гравитационными силами*. Когда мы говорим, что гравитационная энтропия мала, мы имеем в виду, что гравитационные силы имеют потенциал, чтобы сгенерировать значительные количества энтропии благодаря сгущиванию материи. Реализуя такой энтропийный потенциал, сгустки материи создают неоднородное, негомогенное гравитационное поле — деформации и рябь в пространстве-времени, — которое в тексте я описывал как имеющее более высокую энтропию. Но, как ясно из этого обсуждения, на самом деле оно (это поле) может мыслиться как сгущенная материя плюс произведённое в процессе сгущивания излучение, имеющие вместе более высокую энтропию, чем когда материя однородно рассеяна (и поле однородно). Это хорошо, поскольку эксперт заметит, что если мы рассматриваем классический гравитационный фон (классическое пространство-время) как когерентное состояние гравитонов, это существенно единственное (квантовое) состояние, а потому оно имеет низкую энтропию. Определение энтропии возможно только при подходящем усреднении — переходе к

классическому пределу. Однако подчеркнём, что это не особенно необходимо. С другой стороны, если сгусток материи достаточен, чтобы создать чёрную дыру, тогда энтропия действительно становится атрибутом самой гравитации: площадь горизонта событий чёрной дыры (как объясняется далее в главе 16) является мерой энтропии чёрной дыры. И эта энтропия может быть однозначно названа гравитационной энтропией.

Точно так же, как возможны и разбивание яйца, и собирание заново кусочков скорлупы разбитого яйца в первоначальное яйцо, для квантово-индуцированных флуктуаций возможны и вырастание до больших неоднородностей (как мы описывали), и (для достаточно коррелированных неоднородностей) работа в тандеме, подавляющая такой рост. Таким образом, инфляционный вклад в генерацию стрелы времени также требует достаточно некоррелированных начальных квантовых флуктуаций. Ещё раз, если мы думаем в духе Больцмана, среди всех флуктуаций, дающих подходящие условия для инфляции, рано или поздно найдётся такая, которая удовлетворяет всем этим условиям, позволяя Вселенной начаться.

Некоторые физики утверждают, что дела обстоят лучше, чем описано. Например, Андрей Линде доказывает, что при хаотической инфляции (см. примечание [\[134\]](#)) наблюдаемая Вселенная рождается из кусочка планковского размера, содержащего однородное поле инфлатона с плотностью энергии планковского масштаба. При определённых предположениях Линде далее показывает, что энтропия *однородного* поля инфлатона в таком крошечном кусочке примерно равна энтропии любой другой конфигурации поля инфлатона, а потому условия, необходимые для достижения инфляции, не были какими-то особенными. Энтропия этого кусочка планковского размера была мала, но сопоставима с возможной энтропией, которую кусочек планковского размера мог бы иметь. Последующий инфляционный взрыв затем в один миг создал гигантскую Вселенную с намного более высокой энтропией — но с такой, которая, благодаря гладкости и однородности распределения материи, была также чудовищно далека от энтропии, которую она могла бы иметь. Стрела времени задаёт направление, в котором этот разрыв в величине энтропии будет уменьшаться.

Хотя я неравнодушен к этому оптимистичному взгляду, но до тех пор, пока мы не достигнем лучшего понимания физических основ, благодаря которым возникает инфляция, следует проявлять осторожность. Отметим, что этот подход использует неподтверждённые предположения о высокоэнергетических (транспланковских) модах поля инфлатона — модах, которые могут влиять на начало инфляции и играть ключевую роль в формировании структуры Вселенной.

Косвенные доказательства, которые я имею в виду, основываются на факте, что силы всех трёх негравитационных взаимодействий зависят от энергии и температуры окружающей среды, в которой работают эти взаимодействия. При низких энергиях и температурах, таких как в нашем повседневном окружении, силы всех трёх взаимодействий различаются. Но имеются косвенные теоретические и экспериментальные указания на то, что при очень высоких температурах, которые имели место в самые ранние моменты Вселенной, величины всех трёх сил сходятся, указывая, хотя и косвенно, что сами все три силы могут быть объединены на фундаментальном уровне и выглядят различными только при низких энергиях и температурах. Для более детального обсуждения см., например, *«Эlegantную Вселенную»*, главу 7.

Склонный к математике читатель должен отметить, что из принципа неопределённости следует, что флуктуации энергии обратно пропорциональны временному разрешению наших измерений, так что чем точнее разрешение во времени, с которым мы исследуем энергию поля, тем сильнее будут флуктуации поля.

В этом эксперименте Ламоро измерил силу Казимира на модифицированной установке, использующей притяжение между сферической линзой и кварцевой пластинкой. Позднее Джианни Каруньо, Роберто Онофрио и их сотрудники в университете Падуи поставили более сложный эксперимент, использующий исходную идею Казимира с двумя параллельными пластинами. (Сохранение пластин совершенно параллельными действительно является сложной экспериментальной проблемой.) Пока они смогли подтвердить предсказания Казимира с точностью 15%.

Ретроспективно эти достижения также показывают, что если бы Эйнштейн не ввёл космологическую постоянную в 1917 г., квантовым физикам пришлось бы ввести собственную версию её несколькими десятилетиями позже. Как вы вспомните, космологическая постоянная является энергией, которая, как представлял Эйнштейн, заполняет всё пространство, но что является её источником, он — и современные сторонники космологической постоянной — оставил не определённым. Теперь мы понимаем, что квантовая физика заполняет пустое пространство флуктуирующими полями, и, как мы непосредственно видим благодаря открытию Казимира, результирующий микроскопический хаос полей наполняет пространство энергией. Фактически, крупнейший вызов, брошенный теоретической физике, состоит в том, чтобы показать, что совокупный вклад всех флуктуаций полей даёт полную энергию пустого пространства — полную космологическую постоянную, — которая укладывается в пределы, даваемые наблюдениями за сверхновыми, как обсуждалось в главе 10. До сегодняшнего дня никто не смог этого сделать; проведение точного анализа находится за пределами досягаемости современных теоретических методов, а приближённые вычисления дают ответы, чудовищно превосходящие то, что дают наблюдения, определённо указывая на то, что эти приближения никуда не годятся. Многие рассматривают объяснение величины космологической постоянной (равна ли она нулю, как ещё думают, или мала и отлична от нуля, как следует из инфляции и из данных по сверхновым) как одну из самых важных открытых проблем в теоретической физике.

В этом разделе я описываю один способ видения конфликта между общей теорией относительности и квантовой механикой. Но в связи с темой поиска правильной природы пространства и времени я должен заметить, что при попытках объединения общей теории относительности и квантовой механики возникают и другие несколько менее понятные, но потенциально важные загадки. Одна из особенно трудных загадок возникает, когда процедура трансформации классической негравитационной теории (вроде электродинамики Максвелла) в квантовую теорию прямолинейно применяется к классической общей теории относительности (как показал Брюс ДеВитт, эта загадка относится к так называемому уравнению Уилера-ДеВитта). В центральном уравнении, которое при этом возникает, получается, что отсутствует переменная времени. Так что вместо того чтобы получить явную математическую реализацию концепции времени — как в случае любой другой фундаментальной теории, — в этом подходе квантования гравитации эволюция во времени должна отслеживаться некоторым физическим свойством Вселенной (таким как её плотность), которое, как мы ожидаем, должно изменяться регулярным образом. На данный момент никто не знает, работоспособна ли эта процедура квантования гравитации (хотя недавно в одном ответвлении этого формализма, именуемом *петлевой квантовой гравитацией* (см. главу 16), был достигнут большой прогресс), так что неясно, скрывает ли отсутствие явной переменной времени что-то более глубокое (время как производная, эмерджентная концепция?), или нет. В этой главе мы сосредоточимся на другом подходе к объединению общей теории относительности и квантовой механики, *теории суперструн*.

Отчасти неправильно говорить о «центре» чёрной дыры как о некотором месте в пространстве. Причина, грубо говоря, заключается в том, что когда кто-то пересекает горизонт событий чёрной дыры — её внешний край, — роли пространства и времени для него меняются местами. Фактически, точно так же, как вы не можете сопротивляться переходу от одной секунды к другой во времени, вы не можете сопротивляться затягиванию в «центр» чёрной дыры, если вы пересекли горизонт событий. Оказывается, что эта аналогия между направленностью вперёд во времени и устремлением к центру чёрной дыры строго обосновывается математическим описанием чёрных дыр. Таким образом, вместо того чтобы думать о центре чёрной дыры как о положении в пространстве, лучше думать о нём как о положении во времени. Более того, поскольку вы не можете уйти за центр чёрной дыры, вы могли бы попытаться думать о нём как о положении в пространстве-времени, где время приходит к концу. Это вполне может оказаться и правильным. Однако, поскольку стандартные уравнения общей теорией относительности не работают при таких экстремально малых размерах и гигантских плотностях массы, наша способность делать определённые утверждения такого типа компрометируется. Конечно, это означает, что если бы мы имели уравнения, которые работали бы в глубине чёрной дыры, мы смогли бы получить важные результаты о природе времени. Это одна из целей теории суперструн.

Как и в предыдущих главах, под «наблюдаемой Вселенной» я подразумеваю ту часть Вселенной, с которой мы могли бы, по крайней мере в принципе, иметь сообщение в течение времени с момента Большого взрыва. Во Вселенной, которая бесконечна в пространстве, как обсуждалось в главе 8, всё пространство *не* сжато в точку в момент Взрыва. Определённо, когда мы всё более приближаемся к началу, наблюдаемая часть Вселенной всё более сжимается, но, хотя это трудно изобразить, имеются объекты — бесконечно далеко удалённые, — которые всегда будут оставаться отделёнными от нас, несмотря на то что плотность материи и энергии всё более возрастает.

Леонард Сасскинд в «Элегантной Вселенной», NOVA, трёхчасовые серии Государственной службы радиовещания (PBS), впервые вышли в эфир 28 октября и 4 ноября 2003 г.

На самом деле сложность проведения экспериментального тестирования для теории суперструн представляет собой ключевое препятствие, которое существенно затрудняет принятие теории. Однако, как мы увидим в следующих главах, в этом направлении был достигнут немалый прогресс; струнные теоретики очень надеются, что находящиеся на подходе ускорители и эксперименты с космическим базированием дадут по меньшей мере косвенные подтверждения в поддержку теории, а при удаче, может быть, даже больше.

Хотя я не касался этого в тексте явно, замечу, что каждая известная частица имеет *античастицу* — частицу с той же массой, но с противоположным силовым зарядом (вроде противоположного знака электрического заряда). Античастица электрона есть позитрон; античастица *u*-кварка есть анти-*u*-кварк и т. д.

Как мы увидим в главе 13, недавние работы по теории струн наводят на мысль, что струны могут быть намного больше планковской длины, и это даёт множество критических следствий, включая возможность экспериментальной проверки теории.

Существование атомов сначала доказывалось косвенными путями (как объяснение особых пропорций, в которых могут соединяться различные химические вещества, а позже через броуновское движение); существование первых чёрных дыр было подтверждено (к удовлетворению многих физиков) благодаря наблюдению их влияния на газ, который падает на них с расположенных рядом звёзд, а не через «наблюдение» их непосредственно.

Поскольку даже слабо колеблющаяся струна имеет *некоторое* количество энергии, вы можете поинтересоваться, как это возможно для колебательной моды струны давать безмассовую частицу. Ответ снова связан с квантовой неопределённостью. Независимо от того, насколько спокойна струна, квантовая неопределённость означает, что она имеет некоторое минимальное количество дрожаний и ряби. И благодаря волшебству квантовой механики эти индуцированные неопределённостью колебания имеют *отрицательную* энергию. Когда это объединяется с положительной энергией от самых слабых из обычных колебаний струны, полная материя/энергия оказывается равной нулю.

Как можно отметить для склонного к математике читателя, наиболее точное утверждение состоит в том, что *квадраты* масс колебательных мод струны являются целыми крайними квадрата планковской массы. Ещё более точно (и в соответствии с недавними разработками, затронутыми в главе 13), квадраты этих масс являются целыми крайними *струнного масштаба* (что пропорционально обратному квадрату длины струны). В общепринятой формулировке теории струн струнный масштаб и планковская масса связаны, почему я и допустил упрощение в главном тексте и ввёл только планковскую массу. Однако в главе 13 мы рассмотрим ситуации, в которых струнный масштаб может отличаться от планковской массы.

Не так уж трудно понять, в упрощённых терминах, как планковская длина вкралась в анализ Клейна. Общая теория относительности и квантовая механика используют три фундаментальные постоянные природы: c (скорость света), G (константа гравитационного взаимодействия) и \hbar (постоянная Планка, описывающая величину квантовых эффектов). Эти три константы могут быть так объединены, чтобы получилась величина с размерностью длины: $(\hbar G/c^3)^{1/2}$, которая, по определению, является планковской длиной. После подстановки численных значений трёх констант находим для планковской длины примерно $1,616 \times 10^{-33}$ см. Таким образом, если только в теории не получается безразмерный множитель, существенно отличающийся от единицы, — что не часто происходит в простой, хорошо сформулированной физической теории, — мы ожидаем, что планковская длина будет характерной величиной длины, такой как длина свёрнутого пространственного измерения. Тем не менее заметим, что это не исключает возможности, что размеры могут оказаться больше планковской длины, и в главе 13 мы познакомимся с недавней интересной работой, в которой исследуется эта возможность.

Включение в теорию заряженной частицы с относительно маленькой массой оказывается труднопреодолимой проблемой.

Заметим, что требование симметрии, заключающейся в однородности пространства, которое мы использовали в главе 8, чтобы сузить количество форм Вселенной, мотивируется астрономическими наблюдениями (такими как наблюдения микроволнового фонового излучения) трёх больших измерений. Эти условия симметрии не влияют на форму возможных шести микроскопических дополнительных измерений.

Вы можете поинтересоваться, возможны ли не только дополнительные пространственные измерения, но также и дополнительные временные измерения. Исследователи (такие как Ицхак Барс из университета Южной Калифорнии) рассмотрели эту возможность и показали, что по меньшей мере возможно сформулировать теорию со вторым временным измерением, которая кажется физически разумной. Но является ли это второе временное измерение реальным наряду с обычным временным измерением или это только математический трюк, до конца не было установлено; общее ощущение скорее в пользу второго, чем первого. Наоборот, наиболее прямое прочтение теории струн говорит, что дополнительные пространственные измерения являются во всех отношениях столь же реальными, как и три, которые мы знаем.

Для математически подкованного читателя: я говорю здесь о *конформной* симметрии — симметрии, обладающей свойством сохранения углов при преобразовании области пространства, занимаемой предполагаемым элементарным объектом. Струны замечают в своей эволюции двумерные мировые поверхности в пространстве-времени, а уравнения теории струн инвариантны относительно группы двумерных конформных преобразований, являющейся *бесконечномерной* группой. В пространствах другой размерности, связанных с объектами, которые сами по себе не являются одномерными, группа конформных преобразований является конечномерной.

Многие физики внесли значительный вклад в эти исследования, заложив их фундамент или обнаружив важные следствия: Майкл Дафф, Пол Хау, Такео Инами, Келли Стелле, Эрик Бергшофф, Эргин Сезгин, Пол Таунсенд, Крис Халл, Крис Поп, Джон Шварц, Ашок Сен, Эндрю Строминджер, Кертис Каллан, Джозеф Польчински, Петр Хорава, Джин Дай, Роберт Лей, Герман Николаи, Бернард деВитт и многие другие.

В действительности, как разъяснено в главе 12 «Элегантной Вселенной», есть даже более тесная связь между невыявленным десятым измерением и p -бранами. По мере увеличения размера десятого измерения, скажем, в формулировке типа IIA, одномерные струны превращаются в мембраноподобные двумерные трубки. В предположении малости десятого измерения (как всегда неявно подразумевалось до открытия М-теории) эти трубки выглядят и ведут себя как струны. Как и в случае со струнами, остаётся открытым вопрос, являются ли эти найденные браны неделимыми или они состоят из ещё более тонких элементов. Исследователи не исключают возможности, что объекты, до сих пор обнаруженные в теории струн / М-теории, не приведут к прекращению поисков *элементарных* составляющих Вселенной. Но, возможно, и приведут. Поскольку многое из последующего не затрагивается этой проблемой, мы ради простоты предположим, что все объекты — струны и браны более высокой размерности — являются фундаментальными. Как тогда насчёт более ранних рассуждений, приводивших к выводу, что элементарные объекты более высокой размерности не могут быть включены в физически осмысленную конструкцию? Дело в том, что сами эти рассуждения основывались на другой приближённой схеме квантовой механики — стандартной и проверенной схеме, но имеющей свои ограничения, как и любое приближение. Хотя исследователям ещё предстоит постичь все тонкости, связанные с включением в квантовую теорию объектов высокой размерности, но эти объекты столь органично вплетаются во все пять формулировок теории струн, что почти все верят в то, что они не нарушают ни одного основополагающего и священного принципа физики.

В действительности мы могли бы жить на бране даже более высокой размерности (4-бране, 5-бране...), три измерения которой заполняют обычное пространство, а прочие измерения заполняют некоторые из миниатюрных дополнительных измерений, требующихся в теории.

Математически подкованный читатель должен заметить, что в течение многих лет было известно: замкнутые струны подчиняются принципу Т-дуальности (как это разъяснено в главе 10 «Элегантной Вселенной» и о чём мы далее будем говорить в главе 16). Принцип Т-дуальности состоит вот в чём: если дополнительное измерение имеет форму окружности, то теории струн совершенно всё равно, будет ли радиус окружности равен R или $1/R$. Причина состоит в том, что струны могут двигаться как вдоль окружности («колебательные моды»), так и наматываться на неё («топологические моды»), а при замене R на $1/R$ роли этих мод просто меняются, так что физические выводы теории остаются прежними. В этом рассуждении существенно, что струны являются замкнутыми петлями, поскольку если они незамкнуты, то отсутствует топологически стабильное понятие наматывания на циклическое измерение. Так что на первый взгляд кажется, что замкнутые и незамкнутые струны ведут себя совершенно по-разному при Т-дуальности. Но при более внимательном рассмотрении, используя граничные условия Дирихле для открытых струн (этим объясняется буква «D» в названии «D-браны»), Польчински, Дай, Лей, так же как и Хорава, Грин и другие исследователи решили эту загадку.

Чтобы обойти введение тёмной материи или тёмной энергии, выдвигались и предположения, что закон гравитации даже на крупных масштабах может отличаться от ньютоновского или эйнштейновского, и таким путём можно было бы объяснить гравитационные эффекты, несовместимые только с видимой нами материей. Но пока что такие предположения носят чисто спекулятивный характер и не получили заметной поддержки, ни экспериментальной, ни теоретической.

Это предположение было высказано С. Гиддингсом и С. Томасом, а также С. Димополусом и Г. Ландсбергом.

Заметим, что фаза сжатия такой «отскакивающей» Вселенной — это не «расширение наоборот». Физические процессы, такие как разбивание яйца и таяние свечи, проходили бы в обычном «прямом» направлении в ходе фазы расширения и продолжали бы течь в том же направлении и в фазе сжатия. Вот почему энтропия возрастала бы в ходе обеих фаз.

Искушённый читатель отметит, что циклическая модель может быть изложена на языке четырёхмерной теории поля одной из 3-бран, и в этом виде она разделяет многие черты инфляционных моделей с более привычным скалярным полем. Говоря о «совершенно новом механизме», я имею в виду концептуальное описание в терминах сталкивающихся бран, что само по себе является совершенно новым подходом в космологии.

Не сбейтесь со счёта при подсчёте количества измерений. Две 3-браны вместе с разделяющим их измерением составляют четыре измерения. Время — пятое измерение. На пространство Калаби–Яу остаётся шесть измерений.

Важное исключение составляют неоднородности гравитационного поля, это так называемые реликтовые гравитационные волны; об этом будет упомянуто в конце этой главы и более подробно будет рассматриваться в следующей главе. Инфляционная космология и циклическая модель разнятся в этом отношении, причём эта разница допускает экспериментальную проверку.

Квантовая механика утверждает, что всегда существует ненулевая вероятность того, что случайная флуктуация нарушит циклический процесс (например, одна брана повернётся относительно другой), из-за чего модель перестанет быть верной. Даже если эта вероятность ничтожно мала, рано или поздно она наверняка реализуется, и, следовательно, циклы не могут бесконечно сменять друг друга.

Einstein A. *Vierteljahrschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen*. 1912. Vol. 44. № 37; Brill D., and Cohen J. *Phys. Rev.* 1966. Vol. 143. № 4. P. 1011; Pfister H. and Braun K. *Class. Quantum Grav.* 1985. № 2. P. 909.

За четыре десятилетия, прошедшие с момента исходного предложения Шиффа и Пью, проводились и другие эксперименты по выявлению эффекта увлечения. В этих экспериментах (проведённых, среди прочих, Бруно Бертогги, Игнацио Кьюфолини и Петером Бендером, а также И. И. Шапиро, Р. Д. Ризенбергом, Дж. Ф. Чандлером и Р. В. Бэбкоком) изучалось движение Луны и спутников вокруг Земли и были получены веские доказательства существования эффекта увлечения. Преимущество эксперимента со спутником «Gravity Probe B» состоит в том, что это первый полностью контролируемый эксперимент, и поэтому он должен дать самое точное и самое прямое доказательство существования эффекта увлечения.

Есть и другое ограничение такой визуализации открытия Эйнштейна — она не передаёт искажение времени. Это важно из-за того, что общая теория относительности показывает: для обычных объектов наподобие Солнца (в отличие от крайних случаев типа чёрных дыр) искажение времени гораздо больше выражено, чем искажение пространства. Искращения времени гораздо труднее передать графически, и не менее трудно представить, как искажение времени влияет на искривлённые пространственные траектории, такие как эллиптическая орбита Земли при вращении вокруг Солнца; вот почему на рис. 3.10 (и практически на каждой иллюстрации, которую мне приходилось видеть, пытающейся графически передать результаты общей теории относительности) принимается во внимание искривление только пространства. Но не следует забывать, что в большинстве астрофизических ситуаций доминирует искажение времени.

В 1974 г. Рассел Халс и Джозеф Тейлор открыли двойную систему пульсаров — два пульсара (быстро вращающиеся нейтронные звёзды), обращающиеся друг вокруг друга. Поскольку пульсары движутся очень быстро и очень близко друг к другу, то общая теория относительности Эйнштейна предсказывает, что они испускают сильное гравитационное излучение. Хотя очень проблематично обнаружить это излучение непосредственно, общая теория относительности показывает, что излучение должно проявляться и косвенно: излучение энергии должно приводить к постепенному уменьшению периода орбитального движения пульсаров. Пульсары непрерывно наблюдались с момента их открытия, и было обнаружено, что их орбитальный период действительно уменьшился, и это уменьшение согласуется с предсказаниями общей теории относительности с точностью до одной тысячной. Таким образом, это служит веским свидетельством в пользу существования гравитационного излучения даже без его прямого обнаружения. За это открытие Халс и Тейлор удостоились Нобелевской премии по физике за 1993 г.

Однако см. примечание [{187}](#).

Поэтому с точки зрения энергетики космические лучи дают естественный ускоритель частиц, гораздо более мощный, чем любой из имеющихся у нас в настоящее время или который мы сможем построить в обозримом будущем. Недостаток этого естественного ускорителя состоит в том, что хотя частицы космических лучей обладают чрезвычайно высокими энергиями, но мы не можем управлять, что с чем сталкивать — когда дело доходит до столкновений космических частиц, мы оказываемся пассивными наблюдателями. Более того, доля космических частиц с заданной энергией быстро падает по мере повышения энергии частиц. Хотя около 10 млрд частиц космических лучей с энергией, эквивалентной массе протона (что составляет примерно одну тысячную от расчётной мощности Большого адронного коллайдера) каждую секунду падает на каждый квадратный километр поверхности Земли (и несколько из них каждую секунду проходят через ваше тело), но только *одна* из самых энергетических частиц (с энергией порядка 100 млрд масс протона) попадает в заданный квадратный километр поверхности Земли за целое *столетие*. Наконец, в ускорителях можно сталкивать частицы, летящие в противоположных направлениях, что повышает энергию центра масс системы частиц. Частицы же космических лучей сталкиваются, напротив, с относительно медленно движущимися частицами атмосферы. Тем не менее эти недостатки не являются непреодолимыми. За несколько десятилетий учёные довольно много узнали из изучения данных по более обильным космическим лучам с более низкой энергией, а для борьбы с малочисленностью высокоэнергетических столкновений экспериментаторы построили гигантские массивы детекторов, чтобы поймать как можно больше частиц.

Подготовленный читатель заметит, что сохранение энергии в теории с динамическим пространством-временем является очень тонким вопросом. Конечно, тензор напряжений от всех источников для уравнений Эйнштейна ковариантно сохраняется. Но отсюда не обязательно следует глобальный закон сохранения энергии. И на то есть причина. Тензор напряжений не учитывает гравитационной энергии — это общеизвестная трудность общей теории относительности. На достаточно коротких расстояниях и за достаточно короткий промежуток времени (таких как в экспериментах с ускорителями) энергия сохраняется локально, но утверждения относительно глобального сохранения должны делаться с большей осторожностью.

Это верно для простейших инфляционных моделей. Исследователи обнаружили, что в более сложных реализациях инфляции рождение гравитационных волн может подавляться.

Перспективным кандидатом на роль тёмной материи должна быть стабильная или очень долго живущая частица, которая не распадается на другие частицы. Ожидается, что это верно для легчайших из суперсимметричных партнёров частиц, а потому корректнее будет сказать, что легчайшие зино, хиггсино и фотино являются подходящими кандидатами на роль тёмной материи.

Не так давно исследовательская группа, работающая над совместным итальяно-китайским проектом под названием DAMA (Dark Matter Experiment — эксперимент по обнаружению тёмной материи) в Лаборатории Гран Сассо в Италии, сделала захватывающее дух сообщение, что ими впервые обнаружена тёмная материя. Однако до сих пор ни одна другая группа не смогла проверить их утверждение. На самом деле, в рамках другого проекта под названием CDMS (Cryogenic Dark Matter Search — криогенный поиск тёмной материи), осуществляющегося в Стэнфорде с участием американских и российских учёных, уже накоплены данные, которые, как полагают многие, опровергнут результаты DAMA с высокой степенью достоверности. Помимо этих, запущено или готовится и множество других проектов, направленных на поиск тёмной материи. О некоторых из них можно прочесть на http://hepwww.rl.ac.uk/ukdmc/dark_matter/other_searches.html.

В этом утверждении игнорируются подходы со скрытыми переменными, такие как подход Бома. Но даже в рамках таких подходов нам потребуется телепортировать квантовое состояние объекта (его волновую функцию), для чего недостаточно измерения ряда параметров объекта, таких как его положение и скорость.

В исследовательскую группу Цайлингера также входили Дик Баумистер, Джан-Ви Пан, Клаус Маттле, Манфред Эйбл и Харалд Вайнфуртер, а в группу Де Мартини — С. Джакомини, Г. Милани, Ф. Сциаррино и Е. Ломбарди.

Приведём выкладки для читателя, знакомого с формализмом квантовой механики. Пусть начальное состояние моего фотона в Нью-Йорке описывается функцией

$$|\Psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1,$$

где $|0\rangle_1$ и $|1\rangle_1$ — два поляризационных состояния фотона, про которые мы будем предполагать, что они нормированные, но коэффициенты перед ними произвольны. Моя цель — предоставить Николасу информацию, достаточную для того, чтобы он смог привести свой фотон в то же самое квантовое состояние. С этой целью мы с Николасом для начала обзаводимся парой сцепленных фотонов в состоянии, скажем,

$$|\Psi\rangle_{23} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)|0_2 0_3\rangle - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)|1_2 1_3\rangle.$$

Таким образом, начальное состояние трёхфотонной системы описывается функцией

$$|\Psi\rangle_{123} = \left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}}\right)[|0_1 0_2 0_3\rangle - |0_1 1_2 1_3\rangle] + \left(\frac{\beta}{\sqrt{2}}\right)[|1_1 0_2 0_3\rangle - |1_1 1_2 1_3\rangle].$$

Проведя совместное измерение Белла подсистемы фотонов 1 и 2, я перевожу эту подсистему в одно из четырёх состояний:

$$|\Phi\rangle_{\pm} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)[|0_1 0_2\rangle \pm |1_1 1_2\rangle] \quad \text{и} \quad |\Omega\rangle_{\pm} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)[|0_1 1_2\rangle \pm |1_1 0_2\rangle].$$

Теперь перепишем начальное состояние трёхфотонной системы в терминах собственных состояний подсистемы фотонов 1 и 2:

$$|\Psi\rangle_{123} = \frac{1}{2} \left[|\Phi\rangle_+ (\alpha|0_3\rangle - \beta|1_3\rangle) + |\Phi\rangle_- (\alpha|0_3\rangle + \beta|1_3\rangle) + \right. \\ \left. + |\Omega\rangle_+ (-\alpha|1_3\rangle + \beta|0_3\rangle) + |\Omega\rangle_- (-\alpha|1_3\rangle - \beta|0_3\rangle) \right].$$

Таким образом, выполнив измерение, я переведу систему в одно из этих четырёх состояний. После того как я сообщу Николасу (обычными средствами), какое состояние я обнаружил, он будет знать, что сделать с фотоном 3, чтобы воспроизвести начальное состояние фотона 1. Например,

если я обнаружу состояние $|\Phi\rangle_-$, то Николасу не потребуется ничего делать, поскольку в этом случае фотон 3 уже будет находиться в начальном состоянии фотона 1. Если же я получу другой результат, то Николасу придётся осуществить подходящее вращение (диктуемое конкретным результатом измерения), чтобы привести фотон 3 в желаемое состояние.

В действительности, математически подготовленный читатель заметит, что нетрудно доказать так называемую теорему о невозможности клонирования квантовых состояний. Предположим, что у нас есть унитарный оператор клонирования U , «удваивающий» любое квантовое состояние системы

$$|\alpha\rangle : U|\alpha\rangle \rightarrow |\alpha\rangle|\alpha\rangle.$$

Тогда результатом применения U к $(|\alpha\rangle + |\beta\rangle)$ будет $(|\alpha\rangle|\alpha\rangle + |\beta\rangle|\beta\rangle)$, а не дублированное состояние $(|\alpha\rangle + |\beta\rangle)(|\alpha\rangle + |\beta\rangle)$. Это противоречие показывает, что не существует такого оператора клонирования. (Впервые это было показано Вутерсом и Цуреком в начале 1980-х гг.)

Как в разработке теории, так и в экспериментальной реализации квантовой телепортации приняли участие многие исследователи. Назовём ещё некоторых: исследования Санду Попеску, работавшего в то время в Кембриджском университете, сыграли важную роль в экспериментах, проведённых в Риме, а группа Джеффри Кимбла из Калифорнийского технологического института впервые осуществила телепортацию непрерывных характеристик квантового состояния.

О чрезвычайно интересных достижениях в области запутывания многочастичных систем рассказано, например, в статье: Julsgaard B., Kozhekin A., and Polzik E. S. Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects. *Nature*. 2001. Sept. № 413. P. 400–403.

Одной из наиболее захватывающих и развивающихся областей науки, использующей запутывание квантовых состояний и квантовую телепортацию, являются квантовые вычисления. Квантовые вычисления на популярном уровне хорошо изложены в недавних книгах: Siegfried T. *The Bit and the Pendulum*. New York: John Wiley, 2000; Johnson G. *A Shortcut Through Time*. New York: Knopf, 2003.

Одним из следствий эффектов замедления времени с увеличением скорости, который мы не обсуждали в главе 3, но который будет играть свою роль в данной главе, является так называемый парадокс близнецов. Дело вот в чём: если я и вы двигаемся друг относительно друга с постоянной скоростью, я буду думать, что я не двигаюсь и, следовательно, ваши часы идут медленнее моих. Но вы с тем же правом можете заявить, что это вы неподвижны, а двигаюсь я, и, значит, мои часы идут медленнее ваших. Может показаться парадоксальным, что каждый из нас думает, что часы другого идут медленнее, но этот парадокс легко разрешим. При относительном движении с постоянной скоростью наши часы будут всё удаляться друг от друга и, следовательно, у нас не будет никакой возможности для непосредственного сравнения показаний часов, чтобы определить, какие из них «на самом деле» идут медленнее. А все прочие косвенные сравнения показаний часов (например, с помощью сотовой связи) требуют некоторого времени и происходят на некотором пространственном отдалении, что непременно вводит в игру усложнения, связанные с различным представлением разных наблюдателей о том, что происходит «сейчас», о чём мы говорили в главах 3 и 5. Я не хочу вдаваться здесь во все подробности, но если учесть все релятивистские поправки, то не будет противоречия в том, что каждый из нас заявляет, что часы другого идут медленнее (полное, технически точное, но достаточно элементарное обсуждение этого парадокса приводится, например, в книге: *Тейлор Э. Ф., Уилер Дж. А. Физика пространства-времени*. М.: Мир, 1971). Ситуация становится более загадочной, если, к примеру, вы замедляетесь, останавливаетесь, поворачиваетесь и возвращаетесь ко мне, так что мы сможем напрямую сравнить показания наших часов, устраняя усложнения, связанные с различными представлениями о «сейчас». Когда мы встретимся, чьи часы будут показывать меньшее время? Это так называемый парадокс близнецов: если мы с вами близнецы, то кто из нас при встрече будет выглядеть старше или же мы будем выглядеть одинаково? Ответ такой: мои часы будут показывать большее время и, следовательно, я буду выглядеть старше. Есть множество способов объяснить, почему это так, но проще всего заметить, что когда вы меняете скорость и испытываете ускорение, теряется симметрия между нами — вы можете определённо сказать, что это вы двигаетесь (поскольку, к примеру,

вы *это чувствуете* — или, вспоминая обсуждение в главе 3, в отличие от меня, ваше путешествие по пространству-времени происходит не по прямой линии) и, значит, ваши часы идут медленнее моих. Для вас пройдёт меньше времени, чем для меня.

Джон Уилер, среди прочих, предполагал возможность центральной роли наблюдателей в квантовой Вселенной. Это предположение отражено в одном из его известных афоризмов: «Никакое элементарное явление не является явлением, пока оно не становится наблюдаемым явлением». О захватывающей деятельности Уилера в области физики можно прочесть в книге: Wheeler J. A., Ford K. *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*. New York: Norton, 1998. Роджер Пенроуз также исследовал связь между квантовой физикой и разумом в своих книгах «Новый ум короля» (М.: URSS, 2008), а также «Тени разума: в поисках науки о сознании» (М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2005).

См., например, «Reply to Criticisms» в томе 7 *Albert Einstein* из серии *Library of Living Philosophers* (P. A. Schilpp, ed. New York: MJF Books, 2001).

Stockum W. J. van. *Proc. R. Soc. Edin.* 1937. A 57. P. 135.

Подготовленный читатель заметит, что я упрощаю. В 1966 г. Роберт Герох, будучи студентом Джона Уилера, показал, что можно, по крайней мере в принципе, создать кротовую нору, не разрывая пространство. Но в отличие от более понятного подхода с разрывом пространства для создания кротовой норы, при котором сам факт существования кротовой норы не влечёт за собой путешествие во времени, в подходе Героха на самой стадии создания кротовой норы время должно быть столь искажено, чтобы можно было свободно путешествовать вперёд-назад во времени (но если назад, то не дальше, чем в начало строительства).

Грубо говоря, если вы на скорости, близкой к скорости света, пересечёте область, содержащую такую экзотическую материю, и измерите среднюю плотность энергии, то она окажется отрицательной. Физики говорят, что существование такой экзотической энергии нарушает так называемое усреднённое слабое энергетическое условие.

Проще всего получить экзотическую материю благодаря квантовым флуктуациям электромагнитного поля между параллельными пластинами, как в эксперименте Казимира, о котором говорились в главе 12. Расчёты показывают, что уменьшение квантовых флуктуаций между пластинами (по сравнению с пустым пространством) ведёт к отрицательной средней плотности энергии (и к отрицательному давлению).

Поучительный, хотя и технический обзор кротовых нор содержится в книге: Visser M. *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking*. New York: American Institute of Physics Press, 1996.

Для математически подкованных читателей напомним примечание [{71}](#), говорящее о том, что энтропия определяется как *логарифм* количества всех перестановок (или состояний), что и даёт ответ на поставленный вопрос. Любое состояние молекул воздуха в двух соединённых контейнерах можно получить, задав состояние молекул воздуха в первом контейнера, а затем задав его во втором. Значит, количество перестановок для соединённых контейнеров равно квадрату возможных перестановок внутри каждого из контейнеров. Взяв логарифм от квадрата перестановок, мы получим удвоение энтропии.

Конечно, бессмысленно сравнивать объём с площадью поверхности, поскольку они имеют разные единицы измерения. Здесь я имею в виду то, что по мере увеличения радиуса объём растёт гораздо быстрее, чем площадь поверхности. Таким образом, поскольку энтропия пропорциональна площади поверхности, а не объёму, то она растёт медленнее, чем она бы росла, если бы была пропорциональна объёму.

Здесь по сути всё верно, но сведущий читатель заметит, что я упрощаю. Более точная оценка, предложенная Рафаэлем Буссо, говорит о том, что поток энтропии через некоторую нулевую гиперповерхность (с всюду неположительным параметром фокусировки Θ) ограничен величиной $A/4$, где A — площадь пространственно-подобного поперечного сечения нулевой гиперповерхности («световая поверхность»).

Точнее говоря, энтропия чёрной дыры равна площади её горизонта событий в планковских единицах, помноженной на константу Больцмана и разделённой на 4.

Математически подкованный читатель может припомнить из примечаний к главе 8, что существует и другая концепция горизонта — космического горизонта, — представляющего собой поверхность, отделяющую объекты, с которыми наблюдатель в принципе не может общаться. Предполагается, что такой горизонт также поддерживает энтропию, пропорциональную площади его поверхности.

В 1971 г. английский физик Деннис Габор (венгр по происхождению) был удостоен Нобелевской премии за открытие *голографии*. Стремясь улучшить разрешающую способность электронных микроскопов, Габор в 1940-х гг. искал способ записывать больше информации, закодированной в световых волнах, отражающихся от объекта. Например, фотоаппарат регистрирует лишь интенсивность световых волн: места с высокой интенсивностью света на фотографии получаются более яркими, а места с низкой интенсивностью света получаются более тёмными. Но Габор и многие другие физики понимали, что интенсивность — это только часть информации, переносимой световыми волнами. Мы видели это, к примеру, на рис. 4.3б: хотя интерференционная картина отражает интенсивность (амплитуду) света (волны с более высокой амплитудой дают более яркие участки картины), но сама интерференционная картина возникает из-за наложения волн, проходящих через каждую щель и достигающих своего максимума, минимума и промежуточных значений своей амплитуды на разных участках экрана. Эту информацию называют *фазовой информацией*: говорят, что две световых волны находятся *в фазе* в данной точке, если они усиливают друг друга (они одновременно достигают максимума или минимума), или *в противофазе*, если они гасят друг друга (одна достигает максимума, тогда как другая достигает минимума в той же точке); и, вообще говоря, в каждой точке есть *разность фаз* волн, промежуточная между этими двумя крайностями, приводящая к частичному усилению или гашению результирующей световой волны в каждой точке экрана. Таким образом, интерференционная картина несёт в себе запись фазовой информации интерферирующих световых волн.

Габор придумал установку для записи на специальной плёнке как интенсивности, так и фазовой информации света, рассеянного объектом. Переводя на современный язык, его подход был сродни экспериментальной установке на рис. 7.1, за исключением того, что один из двух лазерных лучей отражался объектом, расположенным на его пути к экрану. Если экран покрыт плёнкой, содержащей подходящий эмульсионный слой, то на плёнке запишется интерференционная картина (в виде мельчайших линий) наложения двух лучей, один из которых беспрепятственно попал на экран, а другой был рассеян объектом. Интерференционная картина содержит информацию как об интенсивности отражённого света, так и о сдвиге фаз

между двумя световыми лучами. Изобретение Габора внесло существенный вклад в научные исследования, позволив значительно усовершенствовать широкий круг измерительных методов. Но для широкой публики самым выдающимся достижением стала разработка художественных и промышленных голограмм.

Обычные фотографии выглядят плоскими из-за записи только интенсивности света. Для передачи глубины нужна фазовая информация. Причина в том, что по мере движения световой волны её амплитуда меняется от минимума к максимуму и обратно, так что фазовая информация — или, точнее, информация о сдвиге фаз между световыми лучами, отражёнными соседними частями объекта, — запечатлевает разницу расстояний, проходимых световыми лучами от разных частей объекта. Например, если вы смотрите на кошку, сидящую прямо перед вами, то её глаза находятся от вас чуть дальше, чем её нос, и эта разница отражается в сдвиге фаз между световыми лучами, отражёнными от разных частей её мордочки. Освещая затем голограмму лазерным светом, мы задействуем фазовую информацию, записанную на голограмме, и тем самым добавляем глубину к изображению. Мы все видели результаты: потрясающие трёхмерные изображения, порождаемые двумерным куском пластика. Хотя заметим, что наши глаза не используют эту фазовую информацию для передачи глубины картины. Вместо этого они используют параллакс: небольшая разница в углах, под которыми свет от одной и той же точки доходит до правого и левого глаза, даёт нужную информацию, которую мозг затем переводит в расстояние до этой точки. Вот почему, к примеру, если человек слепнет на один глаз (или просто прикрывает его), то ощущение глубины ухудшается.

Для математически подкованного читателя это утверждение можно сформулировать следующим образом: луч света (или, в общем смысле, любая безмассовая частица), испущенный из любой точки внутри антидеситтеровского пространства, достигает пространственной бесконечности и возвращается назад за конечное время.

Для математически подкованного читателя сообщаем, что Малдасена работал в контексте $\text{AdS}_5 \times S^5$, и теория на границе возникала из границы AdS_5 .

Это утверждение скорее относится к социологии, чем к физике. Теория струн выросла на традициях физики элементарных частиц, тогда как теория петлевой квантовой гравитации — на традициях общей теории относительности. Однако важно отметить, что на сегодняшний день только теория струн может давать результаты, успешно предсказанные общей теорией относительности, поскольку только теория струн убедительно сводится на больших масштабах к общей теории относительности. Теория петлевой квантовой гравитации хорошо понятна в квантовой области, но оказалось трудным распространить её на область крупномасштабных явлений.

Точнее говоря, как об этом говорилось в главе 13 книги «Элегантная Вселенная», энтропия чёрной дыры была подсчитана ещё в 1970-х гг. в работах Бекенштейна и Хокинга. Однако эти учёные использовали довольно не прямой подход и никогда не считали количество микроскопических перестановок — как в главе 6 — для объяснения найденной ими энтропии. В середине 1990-х гг. этот пробел был заполнен в работе Эндрю Строминджера и Кумруна Вафы, нашедших связь между чёрными дырами и определёнными конфигурациями бран теории струн / М-теории. Грубо говоря, им удалось установить, что определённые особые чёрные дыры допускают ровно такое же количество перестановок образующих их компонентов (чем бы ни были эти компоненты), как и определённые, специально подобранные комбинации бран. Когда они подсчитали количество соответствующих всевозможных перестановок бран (и взяли от него логарифм), то получили тот же ответ, что и найденный годами раньше: энтропия чёрной дыры равна площади горизонта событий чёрной дыры, выраженной в планковских единицах и поделённой на 4. В теории петлевой квантовой гравитации исследователям также удалось показать, что энтропия чёрной дыры пропорциональна площади поверхности её горизонта событий, но точный ответ (площадь поверхности, выраженная в планковских единицах и поделённая на 4) оказалось не так-то легко получить. Если должным образом подобрать особый параметр, называемый параметром Иммирзи, тогда с помощью математического аппарата теории петлевой квантовой гравитации можно действительно получить точный правильный ответ, но пока ещё нет всемирно принятого фундаментального объяснения в рамках самой теории, почему величина этого параметра должна быть именно такой.

Как и во всей книге, я отбрасываю несущественные для понимания численные параметры (хотя и важные в количественном отношении для вычисления точных значений).

Более детальное разъяснение (хотя, всё ещё, общего характера) искривления пространства и времени согласно общей теории относительности можно найти, например, во второй главе моей предыдущей книги (Грин Б. *Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории*).

См., например: Gell-Mann M. *The Quark and the Jaguar*. New York: Freeman, 1994; Price H. *Time's Arrow and Archimedes' Point*. Oxford: Oxford University Press, 1996.

Подготовленный читатель увидит, что я предполагаю, что пространство-время является пространством-временем Минковского. Аналогичные аргументы в других геометриях не обязательно будут давать полное пространство-время.

Склонный к математике читатель заметит, что свет путешествует вдоль нулевых геодезических пространственно-временной метрики, которые, для определённости, мы можем выбрать в виде $ds^2 = dt^2 - a^2(t)$

(dx^2) , где $dx^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$, а x — это сопутствующие координаты. (Сопутствующие координаты — координаты, привязанные к расширяющемуся пространству. Две точки, удаляющиеся друг от друга только из-за хаббловского потока, имеют неизменное расстояние в сопутствующей системе координат. — Прим. ред.) Положив $ds^2 = 0$, что соответствует нулевым геодезическим, для полного сопутствующего расстояния, которое свет, испущенный в момент t , пройдёт

до момента t_0 , найдём $\int_t^{t_0} dt/a(t)$. Если мы умножим это на величину масштабного фактора $a(t_0)$ в момент t_0 , мы рассчитаем физическое расстояние, которое прошёл свет за этот временной интервал. Этот алгоритм может быть использован, чтобы рассчитать, как далеко свет может пройти за данный временной интервал; например, для того, чтобы проверить, являются ли две точки пространства причинно связанными. Как вы можете видеть, для ускоренного расширения даже для достаточно большого t_0 интеграл ограничен, показывая, что свет никогда не достигнет произвольно удалённого сопутствующего положения. Таким образом, во Вселенной с ускоренным расширением имеются места, с которыми мы никогда не сможем связаться, и наоборот, имеются области, которые никогда не смогут связаться с нами. О таких областях говорят как о находящихся за пределами нашего космического горизонта.

В описании в тексте величина поля Хиггса задаётся его расстоянием от центра чаши, так что вы можете удивиться тому, что множество *разных* точек на круговом жёлобе чаши — а именно те, которые находятся на одинаковом расстоянии от центра чаши, — дают *одинаковую* величину поля Хиггса. Ответ, для математически подготовленного читателя, состоит в том, что различные точки жёлоба представляют величины поля Хиггса с одной и той же абсолютной величиной, но с различными фазами (величина поля Хиггса является комплексным числом).

Если мы знаем, что поле, подобное любому из известных силовых полей, является частью структуры космоса, тогда мы знаем, что оно существует везде — оно вплетено в ткань космоса. Невозможно удалить поле, так же как невозможно удалить само пространство. Следовательно, самое большее, что мы можем сделать в смысле удаления поля, это иметь его с величиной, которая минимизирует его энергию. Для силовых полей вроде электромагнитного эта величина равна нулю, как обсуждается в тексте. Для полей вроде инфлатона или поля Хиггса стандартной модели (которое для простоты мы тут не рассматриваем) эта величина может быть не равна нулю, и значение этой величины зависит от точной формы потенциальной энергии поля, как мы обсуждали в главах 9 и 10. Как отмечено в тексте, чтобы не отвлекаться от сути дискуссии, мы явно обсуждаем только квантовые флуктуации полей, состояние минимальной энергии которых достигается при нулевой величине поля, хотя флуктуации, связанные с полями Хиггса или инфлатона, не приводят к изменениям в выводах.

Эксперты в теории струн (и те, кто прочитал «*Элегантную Вселенную*», главу 12) заметят, что более точное утверждение состоит в том, что определённые формулировки теории струн (обсуждаемые в главе 13 этой книги) допускают предельные случаи, в которых имеется одиннадцать пространственно-временных измерений. Всё ещё обсуждается, не лучше ли думать о теории струн как о теории, на фундаментальном уровне действующей в одиннадцати пространственно-временных измерениях, или одиннадцатимерная формулировка должна рассматриваться как частный предел (например, когда константа струнного взаимодействия выбирается большой в формулировке теории типа IIA) наряду с другими пределами. Так как это различие мало влияет на наше обсуждение на общем уровне, я выбрал первую точку зрения, в значительной степени из-за литературной простоты, когда имеется фиксированное и неизменное число измерений.