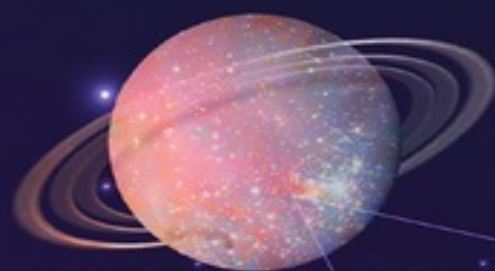


Брайан Кокс
Джефф Форшоу

КВАНТОВАЯ ВСЕЛЕННАЯ

КАК УСТРОЕНО ТО,
ЧТО МЫ НЕ МОЖЕМ
УВИДЕТЬ



Annotation

В этой книге авторитетные ученые Брайан Кокс и Джефф Форшоу знакомят читателей с квантовой механикой – фундаментальной моделью устройства мира. Они рассказывают, какие наблюдения привели физиков к квантовой теории, как она разрабатывалась и почему ученые, несмотря на всю ее странность, так в ней уверены.

Книга предназначена для всех, кому интересны квантовая физика и устройство Вселенной.

На русском языке публикуется впервые.

- [Брайан Кокс, Джефф Форшоу](#)
 -
 - [1. Что-то странное грядет](#)
 - [2. В двух местах одновременно](#)
 - [3. Что такое частица?](#)
 - [4. Все, что может случиться, действительно случается](#)
 -
 - [Принцип неопределенности Гейзенберга](#)
 - [Вывод принципа неопределенности Гейзенберга из теории циферблатов](#)
 - [Краткая история постоянной Планка](#)
 - [Обратно, к принципу неопределенности Гейзенберга](#)
 - [5. Движение как иллюзия](#)
 -
 - [Волновые пакеты](#)
 - [6. Музыка атомов](#)
 -
 - [Атомный ящик](#)
 - [7. Вселенная на булавочной головке \(и почему мы не проваливаемся сквозь землю\)](#)
 - [8. Взаимозависимость](#)
 - [9. Современный мир](#)
 - [10. Взаимодействие](#)
 -
 - [Проблема измерения в квантовой теории](#)
 - [Антиматерия](#)

- [11. Пустое пространство не такое уж пустое](#)
 -
 - [Стандартная модель физики частиц](#)
 - [Происхождение массы](#)
- [Эпилог: смерть звезд](#)
- [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](#)
-

Брайан Кокс, Джефф Форшоу Квантовая вселенная. Как устроено то, что мы не можем увидеть

Научные редакторы Вячеслав Марача и Михаил Павлов

*Издано с разрешения Apollo's Children Ltd and Jeff Forshaw
и литературного агентства Diane Banks Associates Ltd.*

Книга рекомендована к изданию Романом Петренко

*Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая фирма
«Вегас-Лекс».*

© Brian Cox and Jeff Forshaw, 2011

© Перевод на русский язык, издание на русском языке, оформление.
ООО «Манн, Иванов и Фербер», 2016

* * *

1. Что-то странное грядет

Квант. Это слово одновременно вызывает к чувствам, сбивает с толку и завораживает. В зависимости от точки зрения это либо свидетельство обширных успехов науки, либо символ ограниченности человеческой интуиции, которая вынуждена бороться с неотвратимой странностью субатомной сферы. Для физика квантовая механика – одна из трех великих опор, на которых покоится понимание природы (две другие – это общая и специальная теории относительности Эйнштейна). Теории Эйнштейна имеют дело с природой пространства и времени и силой притяжения. Квантовая механика занимается всем остальным, и можно сказать, что, как бы она ни вызвала к чувствам, сбивала с толку или завораживала, это всего лишь физическая теория, описывающая то, как природа ведет себя в действительности. Но даже если мерить ее по этому весьма прагматичному критерию, она поражает своей точностью и объяснительной силой. Есть один эксперимент из области квантовой электродинамики, старейшей и лучше всего осмысленной из современных квантовых теорий. В нем измеряется, как электрон ведет себя вблизи магнита. Физики-теоретики много лет упорно работали с ручкой и бумагой, а позже с компьютерами, чтобы предсказать, что именно покажут такие исследования. Практики придумывали и ставили эксперименты, чтобы вывести побольше подробностей у природы. Оба лагеря независимо друг от друга выдавали результаты с точностью, подобной измерению расстояния между Манчестером и Нью-Йорком с погрешностью в несколько сантиметров. Примечательно, что цифры, получавшиеся у экспериментаторов, полностью соответствовали результатам вычислений теоретиков; измерения и вычисления полностью согласовывались.

Это не только впечатляюще, но и удивительно, и, если бы построение моделей было единственной заботой квантовой теории, вы могли бы с полным правом спросить, в чем же вообще проблема. Наука, разумеется, не обязана быть полезной, но многие технологические и общественные изменения, совершившие революцию в нашей жизни, вышли из фундаментальных исследований, проводимых современными учеными, которые руководствуются лишь желанием лучше понять окружающий мир. Благодаря этим, вызванным только любопытством, открытиям во всех отраслях науки мы имеем увеличенную продолжительность жизни, международные авиаперевозки, свободу от необходимости заниматься

сельским хозяйством ради собственного выживания, а также широкую, вдохновляющую и открывающую глаза картину нашего места в бесконечном звездном море. Но все это в каком-то смысле побочные результаты. Мы исследуем из любопытства, а не потому, что хотим добиться лучшего понимания реальности или разработать более эффективные безделушки.

Квантовая теория – возможно, наилучший пример, как бесконечно сложное для понимания большинства людей становится крайне полезным. Она сложна для понимания, поскольку описывает мир, в котором частица может реально находиться в нескольких местах одновременно и перемещается из одного места в другое, исследуя тем самым всю Вселенную. Она полезна, потому что понимание поведения малейших кирпичиков мироздания укрепляет понимание всего остального. Она кладет предел нашему высокомерию, потому что мир намного сложнее и разнообразнее, чем казалось. Несмотря на всю эту сложность, мы обнаружили, что все состоит из множества мельчайших частиц, которые двигаются в соответствии с законами квантовой теории. Законы эти настолько просты, что их можно записать на обратной стороне конверта. А то, что для объяснения глубинной природы вещей не требуется целая библиотека, уже само по себе одна из величайших тайн мира.

Итак, чем больше мы узнаём об элементарной природе мироздания, тем проще оно нам кажется. Постепенно мы придем к пониманию всех законов и того, как эти маленькие кирпичики взаимодействуют, формируя мир. Но как бы мы ни увлекались простотой, лежащей в основе Вселенной, нужно обязательно помнить: хотя основные правила игры просты, их последствия не всегда легко вычислить. Наш повседневный опыт познания мира определяется отношениями многих миллиардов атомов, и пытаться вывести принципы поведения людей, животных и растений из нюансов поведения этих атомов было бы просто глупо. Признав это, мы не принижаем его важности: за всеми явлениями в итоге скрывается квантовая физика микроскопических частиц.

Представьте мир вокруг нас. Вы держите в руках книгу, сделанную из бумаги – перемолотой древесной массы^[1]. Деревья – это машины, способные получать атомы и молекулы, расщеплять их и реорганизовывать в колонии, состоящие из миллиардов отдельных частей. Они делают это благодаря молекуле, известной под названием хлорофилл и состоящей из ста с лишним атомов углерода, водорода и кислорода, которые имеют изогнутую особым образом форму и скреплены еще с некоторым количеством атомов магния и водорода. Такое соединение частиц способно

улавливать свет, пролетевший 150 000 000 км от нашей звезды – ядерного очага объемом в миллион таких планет, как Земля, – и переправлять эту энергию вглубь клеток, где с ее помощью создаются новые молекулы из двуокиси углерода и воды и выделяется дающий нам жизнь кислород.

Именно эти молекулярные цепи формируют суперструктуру, объединяющую и деревья, и бумагу в этой книге, и все живое. Вы способны читать книгу и понимать слова, потому что у вас есть глаза и они могут превращать рассеянный свет от страниц в электрические импульсы, интерпретируемые мозгом – самой сложной структурой Вселенной, о которой мы вообще знаем. Мы обнаружили, что все вещи в мире – не более чем скопища атомов, а широчайшее многообразие атомов состоит всего из трех частиц – электронов, протонов и нейтронов. Мы знаем также, что сами протоны и нейтроны состоят из более мелких сущностей, именуемых кварками, и на них уже все заканчивается – по крайней мере, так мы думаем сейчас. Основанием для всего этого служит квантовая теория.

Таким образом, картину Вселенной, в которой обитаем мы, современная физика рисует с исключительной простотой; элегантные явления происходят где-то там, где их нельзя увидеть, порождая разнообразие макромира. Возможно, это самое выдающееся достижение современной науки – сведение невероятной сложности мира, включая и самих людей, к описанию поведения горстки мельчайших субатомных частиц и четырех сил, действующих между ними. Лучшие описания трех из четырех этих сил – сильного и слабого ядерных взаимодействий, существующих внутри атомного ядра, и электромагнитного взаимодействия, которое склеивает атомы и молекулы, – предоставляет квантовая теория. Лишь сила тяжести – самая слабая, но, возможно, самая знакомая нам сила из всех – в настоящий момент не имеет удовлетворительного квантового описания.

Стоит признать, что квантовая теория имеет несколько странную репутацию, и ее именем прикрывается множество настоящей ахинеи. Коты могут быть одновременно живыми и мертвыми; частицы находятся в двух местах одновременно; Гейзенберг утверждает, что все неопределенно. Все это действительно верно, но выводы, которые часто из этого следуют – раз в микромире происходит нечто странное, то мы окутаны дымкой тумана, – точно неверны. Экстрасенсорное восприятие, мистические исцеления, вибрирующие браслеты, которые защищают от радиации, и черт знает что еще регулярно прокрадывается в пантеон возможного под личиной слова «квант». Эту чепуху порождают неумение ясно

мыслить, самообман, подлинное или притворное недопонимание либо какая-то особенно неудачная комбинация всего вышеперечисленного. Квантовая теория точно описывает мир с помощью математических законов, настолько же конкретных, как и те, что использовали Ньютон или Галилей. Вот почему мы можем с невероятной точностью рассчитать магнитное поле электрона. Квантовая теория предлагает такое описание природы, которое, как мы узнаем, имеет огромную предсказательную и объяснительную силу и распространяется на множество явлений – от кремниевых микросхем до звезд.

Цель этой книги – сорвать покровы таинственности с квантовой теории – теоретической конструкции, в которой путаются слишком многие, включая даже самих первопроходцев в этой отрасли. Мы намерены использовать современную перспективу, пользуясь наработанными за век уроками непредусмотрительности и развития теории. Однако на старте путешествия мы перенесемся в начало XX века и исследуем некоторые проблемы, заставившие физиков радикально отклониться от того, что ранее считалось магистральным направлением науки.

Как часто бывает, появление квантовой теории спровоцировали открытия природных явлений, которые нельзя было описать научными парадигмами того времени. Для квантовой теории таких открытий было много, притом разнообразного характера. Ряд необъяснимых результатов порождал ажиотаж и смятение и в итоге вызвал период экспериментальных и теоретических инноваций, который действительно заслуживает расхожего определения «золотой век». Имена главных героев навсегда укоренились в сознании любого студента-физика и чаще других упоминаются в университетских курсах и по сей день: Резерфорд, Бор, Планк, Эйнштейн, Паули, Гейзенберг, Шрёдингер, Дирак. Возможно, в истории больше не случится периода, когда столько имен будут ассоциироваться с величием науки при движении к единой цели – созданию новой теории атомов и сил, управляющих физическим миром. В 1924 году, оглядываясь на предшествующие десятилетия квантовой теории, Эрнест Резерфорд, физик новозеландского происхождения, открывший атомное ядро, писал: «1896 год... ознаменовал начало того, что было довольно точно названо героическим веком физической науки. Никогда до этого в истории физики не наблюдалось такого периода лихорадочной активности, в течение которого одни фундаментально значимые открытия с бешеной скоростью сменяли другие».

Но прежде чем переместиться в Париж XIX века, к рождению квантовой теории, давайте рассмотрим само слово «квант». Этот термин

появился в физике в 1900 году благодаря работам Макса Планка. Он пытался теоретически описать излучение, испускаемое нагретыми телами, – так называемое «излучение абсолютно черного тела». Кстати, ученого наняла для этой цели компания, занимавшаяся электрическим освещением: так двери Вселенной порой открываются по самым прозаическим причинам. Гениальные прозрения Планка мы обсудим в этой книге позже, а для введения достаточно сказать: он выяснил, что свойства излучения абсолютно черного тела можно объяснить, только если предположить, что свет испускается небольшими порциями энергии, которые он и назвал квантами. Само это слово означает «пакеты», или «дискретные». Изначально он считал, что это лишь математическая уловка, но вышедшая в 1905 году работа Альберта Эйнштейна о фотоэлектрическом эффекте поддержала квантовую гипотезу. Результаты были убедительными, потому что небольшие порции энергии могли быть синонимичны частицам.

Идея того, что свет состоит из потока маленьких пулек, имеет долгую и славную историю, начавшуюся с Исаака Ньютона и рождения современной физики. Однако в 1864 году шотландский физик Джеймс Кларк Максвелл, казалось, окончательно рассеял все существовавшие сомнения в ряде работ, которые Альберт Эйнштейн позднее охарактеризовал как «самые глубокие и плодотворные из всех, что знала физика со времен Ньютона». Максвелл показал, что свет – это электромагнитная волна, распространяющаяся в пространстве, так что идея света как волны имела безукоризненное и, казалось бы, неоспоримое происхождение. Однако в серии экспериментов, которые Артур Комптон и его коллеги провели в Университете Вашингтона в Сент-Луисе, им удалось отделить световые кванты от электронов. Те и другие вели себя скорее как бильярдные шары, что явно подтвердило: теоретические предположения Планка имели прочное основание в реальном мире. В 1926 году световые кванты получили название фотонов. Свидетельство было неопровержимым: свет ведет себя одновременно как волна и как частица. Это означало конец классической физики – и завершение периода становления квантовой теории.

2. В двух местах одновременно

Эрнест Резерфорд называл началом квантовой революции 1896 год, потому что именно тогда Анри Беккерель в своей парижской лаборатории открыл радиоактивность. Беккерель пытался с помощью соединения урана получить рентгеновские лучи, которые буквально за несколько месяцев до этого открыл в Вюрцбурге Вильгельм Рентген. Вместо этого оказалось, что соединения урана испускают *les rayons uraniques*^[2], которые способны засвечивать фотографические пластины, даже если те завернуты в толстый слой бумаги, через который не проникает свет. Важность лучей Беккереля великий ученый Анри Пуанкаре подчеркнул в своей статье еще в 1897 году. Он прозорливо писал об открытии: «...уже сегодня можно считать, что оно дает доступ в совершенно новый мир, о существовании которого мы даже не подозревали». В радиоактивном распаде, объяснявшем открытый эффект, самым загадочным было то, что лучи, казалось, испускаются самопроизвольно и непредсказуемо, без какого-либо внешнего воздействия.

В 1900 году Резерфорд писал об этом: «Все атомы, сформировавшиеся в одно и то же время, должны существовать в течение определенного интервала. Это, однако, противоречит наблюдаемым законам трансформации, согласно которым жизнь атома может иметь любую продолжительность – от нуля до бесконечности». Такое хаотическое поведение элементов микромира стало шоком, потому что до того наука была полностью детерминистской. Если в определенный момент вы знали все, что возможно знать о каком-либо предмете, то считалось, что вы сможете с уверенностью предсказать будущее этого предмета. Отмена этого вида предсказательности – ключевая черта квантовой теории, имеющей дело с возможностью, а не с уверенностью, и не потому, что нам не хватает абсолютного знания, но потому, что некоторые аспекты природы, по сути, управляются законами случая. Поэтому сегодня мы понимаем, что просто невозможно предсказать, когда же именно конкретный атом постигнет распад. Радиоактивный распад – это первая встреча науки с игрой природы в кости, поэтому он много лет смущал умы физиков.

Конечно, много интересного происходило и в самих атомах, хотя их внутренняя структура была в то время совершенно неизвестной. Ключевое открытие совершил Резерфорд в 1911 году. Он с помощью радиоактивного источника бомбардировал тончайший золотой лист так называемыми

альфа-частицами (сейчас мы знаем, что это ядра атомов гелия). Резерфорд вместе с помощниками Гансом Гейгером и Эрнестом Марсденом, к своему немалому удивлению, обнаружил, что примерно одна из 8000 альфа-частиц не пролетает через золотой лист, как ожидалось, а отскакивает прямо назад. Впоследствии Резерфорд описывал этот момент с характерной образностью: «Это было, пожалуй, самое невероятное событие, которое случилось в моей жизни. Оно было настолько же невероятно, как если бы вы выстрелили из пятнадцатидюймовой пушки в кусок туалетной бумаги, а ядро отскочило бы и поразило вас». Резерфорда все считали харизматичным и прямолинейным человеком: однажды он назвал самодовольного чиновника евклидовой точкой: «У него есть положение, но нет величины».

Резерфорд посчитал, что его экспериментальные результаты можно объяснить только тем, что атом состоит из очень маленького ядра и вращающихся вокруг него по орбитам электронов. В то время он, возможно, имел в виду примерно ту же схему, по которой планеты вращаются по орбитам вокруг Солнца. Ядро имеет почти всю массу атома, почему и способно останавливать свои «15-дюймовые» альфа-частицы и отражать их. У водорода, простейшего элемента, ядро состоит из единственного протона радиусом около $1,75 \times 10^{-15}$ м. Если вы не знакомы с этой записью, переведем: 0,000 000 000 000 001 75 м, или примерно 2 тысячемиллионмиллионных метра.

Насколько мы можем судить сейчас, одиночный электрон похож на того самодовольного чиновника по Резерфорду, то есть на точку, и вращается по орбите вокруг ядра атома водорода по радиусу примерно в 100 000 раз больше диаметра ядра.

Ядро имеет положительный электрический заряд, а электрон – отрицательный, и это значит, что между ними есть сила притяжения, которая аналогична силе гравитации, удерживающей Землю на солнечной орбите. Это, в свою очередь, означает, что атомы – это в основном пустое пространство. Если представить себе атомное ядро размером с теннисный мяч, то электрон будет меньше пылинки, летящей за километр от этого мяча. Такие цифры весьма удивляют, потому что твердая материя явно не кажется нам такой уж пустой.

Резерфордовские атомные ядра поставили перед физиками того времени ряд проблем. Например, было хорошо известно, что электрон должен терять энергию при движении по орбите вокруг ядра, поскольку все объекты с электрическим зарядом отдают энергию, двигаясь по искривленным траекториям. Эта идея лежит в основе работы

радиопередатчиков: электроны колеблются, в результате чего создаются электромагнитные радиоволны. Генрих Герц изобрел радиопередатчик в 1887 году, и ко времени открытия Резерфордом атомного ядра уже существовала коммерческая радиостанция, отправлявшая сообщения через Атлантический океан – из Ирландии в Канаду. Таким образом, уже никто не удивлялся теории вращающихся по орбите зарядов и излучения радиоволн, но это смущало тех, кто пытался объяснить, как же электроны остаются на орбите вокруг ядра.

Столь же необъяснимый феномен представлял собой свет, который испускали разогреваемые атомы. Еще в 1853 году шведский ученый Андерс Ангстрем пропустил искру через трубку, наполненную водородом, и проанализировал полученный свет. Можно было предположить, что газ будет светиться всеми цветами радуги; в конце концов, что такое Солнце, как не светящийся газовый шар? Вместо этого Ангстрем обнаружил, что водород светится тремя отчетливыми цветами: красным, сине-зеленым и фиолетовым, давая три чистые узкие дуги, как у радуги. Вскоре было выявлено, что так ведут себя все химические элементы. У каждого из них есть уникальный цветовой штрихкод. К тому времени как Резерфорд выступил по поводу атомного ядра, ученый Генрих Кайзер завершил работу над шеститомным справочником из 5000 страниц, озаглавленным *Handbuch der Spectroscopie* («Справочник по спектроскопии»): он описывал все цветные светящиеся линии известных элементов. Вопрос, конечно, зачем? И не только «Зачем, профессор Кайзер?» (наверное, за обедом над его фамилией нередко шутили), но и «Почему так много цветных линий?». Более 60 лет наука, получившая название спектроскопии, была эмпирическим триумфом и теоретическим провалом.

В марте 1912 года датский физик Нильс Бор, очарованный проблемой строения атома, отправился в Манчестер для встречи с Резерфордом. Позже он отмечал, что попытки расшифровать внутреннее строение атома по данным спектроскопии были чем-то сродни выведению базовых постулатов биологии из раскраски крыла бабочки. Атом Резерфорда с его моделью в духе Солнечной системы дал Бору необходимую подсказку, и в 1913 году он уже опубликовал первую квантовую теорию строения атома. У этой гипотезы, конечно, были свои проблемы, но она содержала несколько важнейших идей, подстегнувших развитие современной квантовой теории. Бор заключил, что электроны могут занимать лишь определенные орбиты вокруг ядра, а орбитой с самой низкой энергией будет ближайшая. Он утверждал также, что электроны способны перепрыгивать с орбиты на орбиту. Они переходят на более отдаленную

орбиту, когда получают энергию (например, от искры в трубке), а затем продвигаются ближе к центру, одновременно излучая свет. Цвет этого излучения непосредственно определяется разностью энергий электрона на этих двух орбитах. Рис. 2.1 иллюстрирует основную идею; стрелка показывает, как электрон перепрыгивает с третьего энергетического уровня на второй, испуская свет (представленный волнистой линией). В модели Бора электрон может двигаться вокруг протона (ядра атома водорода) лишь по одной из особых, «квантованных» орбит; движение по спирали просто запрещено. Таким образом, модель Бора позволила ему вычислить длины волн (то есть цвета) света, который наблюдался Ангстремом: они соответствовали прыжку электрона с пятой орбиты на вторую (фиолетовый цвет), с четвертой орбиты на вторую (сине-зеленый цвет) и с третьей на вторую (красный цвет). Модель Бора к тому же корректно предсказывала существование света, который должен испускаться при переходе электрона на первую орбиту. Этот свет – ультрафиолетовая часть спектра, невидимая человеческому глазу. Поэтому не видел ее и Ангстрем. Однако в 1906 году ее зафиксировал гарвардский физик Теодор Лайман, и эти данные замечательно описывались моделью Бора.

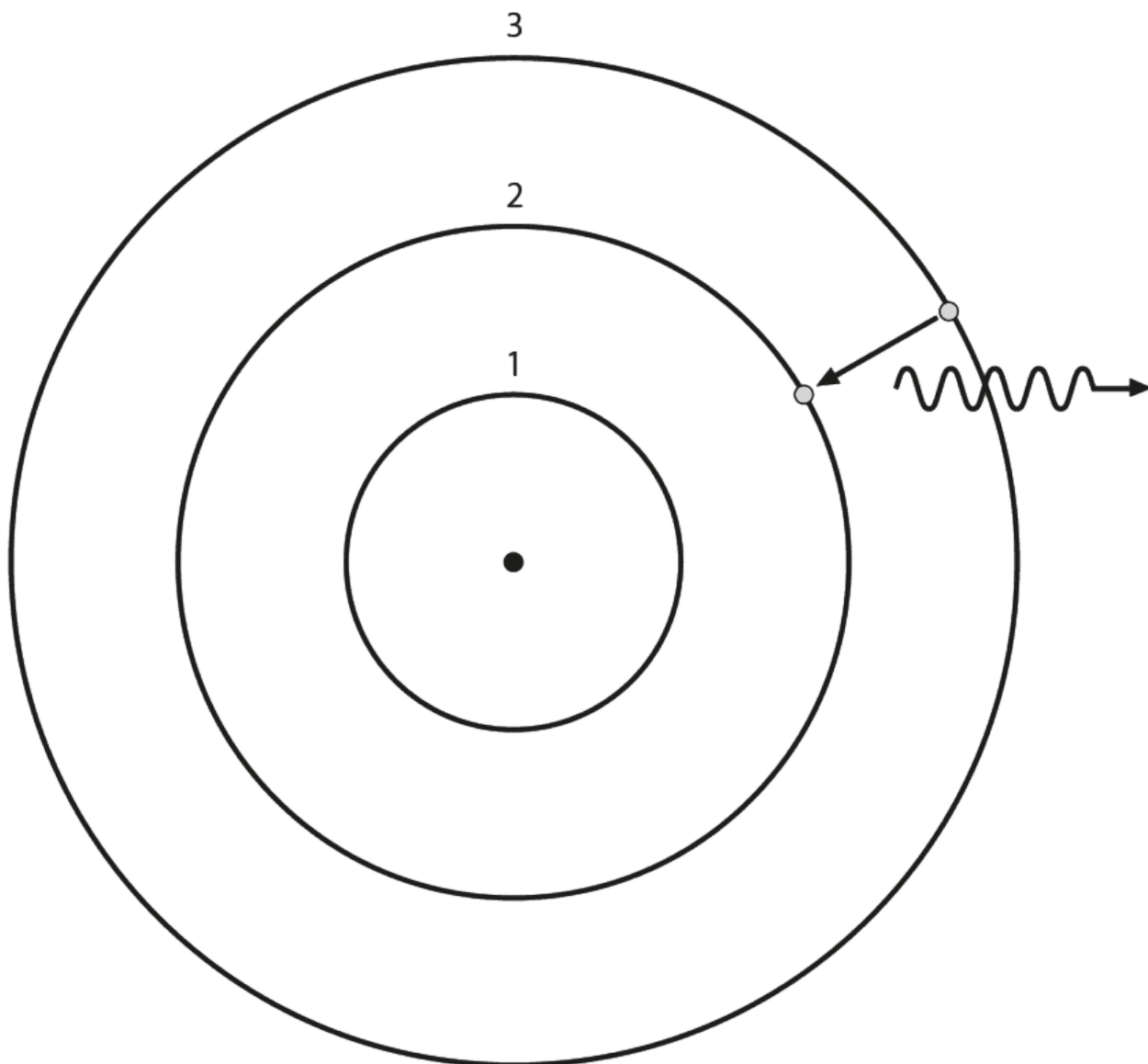


Рис. 2.1. Модель атома Бора, иллюстрирующая испускание фотона (волнистая линия) в результате перехода электрона с одной орбиты на другую (обозначен стрелкой)

Хотя Бор не сумел распространить свою модель дальше атома водорода, выдвинутые идеи можно было применить и к другим атомам. Например, если предположить, что у атомов каждого элемента набор орбит уникален, они будут испускать световые лучи лишь определенного цвета. Таким образом, эти цвета служат своего рода «отпечатками пальцев» атома, и астрономы, разумеется, немедленно воспользовались уникальностью спектральных линий атомов для определения физического состава звезд.

Модель Бора — неплохое начало, но всем была ясна ее недостаточность: например, почему электроны не могут двигаться

по спирали, когда известно, что они должны терять энергию, испуская электромагнитные волны (идея, получившая реальное подтверждение с появлением радио)? И почему орбиты электрона изначально квантуются? И как насчет более тяжелых, чем водород, элементов: что делать для понимания их строения?

Но какой бы несовершенной ни казалась теория Бора, это был критически важный шаг и пример того, как порой учеными достигается прогресс. Нет никакой причины складывать оружие перед лицом озадачивающих и порой ставящих в тупик фактов. В подобных случаях ученые часто делают так называемый *анзац* – прикидку, или, если угодно, правдоподобное допущение, а затем переходят к вычислению его последствий. Если предположение работает, то есть получающаяся теория согласуется с экспериментальными данными, то можно с большей уверенностью вернуться к изначальной гипотезе и пытаться более детально в ней разобраться. Анзац Бора 13 лет оставался успешным, но не до конца объясненным.

Мы вернемся к истории этих ранних квантовых идей на последующих страницах книги, но сейчас перед нами лишь множество странных результатов и вопросы с неполными ответами – как и перед основоположниками квантовой теории. Если резюмировать, то Эйнштейн, следуя за Планком, предположил, что свет состоит из частиц, но Максвелл уже показал, что свет ведет себя как волна. Резерфорд и Бор прокладывали путь к пониманию строения атома, но поведение электрона внутри атома не согласовывалось ни с одной из известных в то время теорий. А разнообразные явления, носящие общее название радиоактивности, при которой атомы спонтанно делятся на части по невыясненным причинам, оставались загадкой – во многом потому, что вносили в физику волнующий элемент случайности. Сомнений не оставалось: в субатомном мире грядет что-то странное.

Совершение первого шага к общему, согласованному ответу на эти вопросы большинство приписывают немецкому физику Вернеру Гейзенбергу. То, что он сделал, стало совершенно новым подходом к теории материи и физических сил. В июле 1925 года Гейзенберг опубликовал статью, в которой рассматривал старые добрые идеи и гипотезы, в том числе модель атома Бора, но под углом зрения совершенно нового подхода к физике. Он начал так: «В этой работе делается попытка получить основы квантовой теоретической механики, которые базируются исключительно на соотношениях между принципиально наблюдаемыми величинами». Это важный шаг, потому что Гейзенберг таким образом подчеркивает:

лежащая в основе квантовой теории математика не обязана согласовываться с чем-то уже известным. Задачей квантовой теории должно стать непосредственное предсказание поведения наблюдаемых объектов – например, цвета световых лучей, испускаемых атомами водорода. Нельзя ожидать от нее сколь-либо удовлетворительного мысленного представления внутреннего механизма поведения атома, потому что это и не нужно, и, может быть, даже нереально. Одним ударом Гейзенберг развеял идею о том, что действия природы непременно согласуются со здравым смыслом. Это не значит, что теория микромира не может согласовываться с нашим повседневным опытом описания движения крупных объектов – например, самолетов или теннисных мячей. Но нужно быть готовым отбросить заблуждение о том, что мелкие предметы оказываются всего лишь маленькими разновидностями крупных, а именно подобное заблуждение и может выработаться в ходе экспериментальных наблюдений.

Нет никаких сомнений, что квантовая теория – вещь хитрая, и уж тем более несомненно, что чрезвычайно хитер и сам подход Гейзенберга. Нобелевский лауреат Стивен Вайнберг, один из величайших современных физиков, так писал о статье Гейзенберга 1925 года:

«Если для читателя остается тайной то, что делал Гейзенберг, он в этом не одинок. Я несколько раз пытался прочитать статью, которую он написал по возвращении с острова Гельголанд, и, хотя я полагаю, что разбираюсь в квантовой механике, так до конца и не уловил обоснования математических действий автора в этой работе. Физики-теоретики в своих самых успешных трудах часто играют одну из двух ролей: они либо мудрецы, либо волшебники... Обычно не так сложно понять работы физиков-мудрецов, но работы физиков-волшебников порой совершенно непостижимы. В этом смысле статья Гейзенберга 1925 года – настоящее волшебство».

Философия Гейзенберга, впрочем, ничего магического собой не представляет. Она проста, и именно она лежит в основе того подхода, которым мы пользуемся в книге: задача объясняющей природу теории – делать количественные предсказания, которые будут сопоставимы с экспериментальными результатами. Мы не имеем возможности разработать теорию, имеющую какое-то отношение к нашему восприятию мира в целом. К счастью, хотя мы и берем на вооружение философию

Гейзенберга, будем следовать более понятному подходу к квантовому миру, разработанному Ричардом Фейнманом.

На последних нескольких страницах этой книги мы неоднократно слишком вольно использовали слово «теория», так что, прежде чем продолжить разрабатывать квантовую теорию, будет полезно подробнее взглянуть на более простую. Хорошая научная теория содержит набор правил, определяющих, что может и чего не может случиться в определенной части мироздания. Теория должна позволять делать предсказания, которые впоследствии пройдут проверку наблюдениями. Если предсказания окажутся ложными, то эта теория неверна и подлежит замене. Если предсказания согласуются с наблюдениями, теория жизнеспособна. Ни одна теория не может считаться «истинной», в том смысле что всегда должна быть возможность ее фальсифицировать, то есть доказать ее ложность. Как писал биолог Томас Гексли, «наука – это упорядоченный здравый смысл, в котором множество прекрасных теорий было убито уродливыми фактами». Любая теория, которая не может быть фальсифицирована, не считается научной; более того, можно даже сказать, что она вообще не содержит никакой достоверной информации. Критерий фальсифицируемости отличает научные теории от обычных мнений. Такое научное понимание термина «теория», кстати, отличается от обиходного употребления, при котором под этим словом часто подразумеваются умозрительные рассуждения. Научные теории могут быть умозрительными, пока они не столкнулись с эмпирическими свидетельствами, но утвердившаяся в науке теория всегда подкреплена большим количеством доказательств. Ученые стараются разрабатывать теории, призванные объяснить как можно больше явлений, а физики, в частности, приходят в восторг от перспективы описать все, что вообще может случиться в материальном мире, с помощью небольшого количества правил.

Один из примеров хорошей теории, применимой во множестве случаев, – это теория Исаака Ньютона о всемирном тяготении, опубликованная 5 июля 1687 года в его «Математических началах натуральной философии». Это была первая современная научная теория, и, хотя впоследствии было доказано, что в некоторых случаях она неточна, в целом эта теория оказалась настолько хороша, что используется и сегодня. Более точную теорию тяготения – общую теорию относительности – разработал Эйнштейн в 1915 году.

Ньютоново описание гравитации можно уложить в одно математическое уравнение:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Эта формула может показаться простой или сложной – в зависимости от ваших математических познаний. В этой книге мы порой будем прибегать к математике. Тем читателям, которым она дается непросто, советуем пропускать уравнения и не особенно беспокоиться. Мы всегда будем стараться изложить ключевые идеи, не прибегая к математике. Добавили ее в основном из-за того, что она позволяет объяснить, почему вещи таковы, какие они есть. Без этого мы выглядели бы какими-то гуру физики, извлекающими глубокие истины прямо из воздуха, а ни один приличный автор этого не хочет.

Но вернемся к уравнению Ньютона. Представьте, что яблоко ненадежно держится на ветке. Мысли о силе притяжения, которые летним днем заставили конкретное спелое яблоко свалиться Ньютону на голову, согласно научному фольклору, стали источником его теории. Ньютон говорил, что на яблоко действует гравитация, которая тянет его к земле, и эта сила в уравнении представлена буквой F . Так что в первую очередь уравнение позволяет высчитать силу, действующую на яблоко, если вы знаете, что значат символы в правой части формулы.

Буква r обозначает расстояние между центром яблока и центром Земли. Оно возведено в квадрат, потому что Ньютон обнаружил, что сила зависит от квадрата расстояния между объектами. Если обойтись без математики, то это значит, что при увеличении расстояния между яблоком и центром Земли вдвое гравитация уменьшится в 4 раза. Если расстояние утроить, сила притяжения упадет в 9 раз. И так далее. Физики называют такое поведение законом обратных квадратов. Буквы m_1 и m_2 обозначают массу яблока и массу Земли, и их появление свидетельствует о понимании Ньютоном закономерности: сила гравитационного притяжения между двумя объектами зависит от произведения их масс. Но возникает вопрос: что такое масса? Этот вопрос интересен сам по себе, и, чтобы получить наиболее исчерпывающий ответ, придется подождать, пока мы не заведем разговор о квантовой частице, известной как бозон Хиггса. Грубо говоря, масса – это мера количества «материала» в чем-то; Земля массивнее яблока. Впрочем, такое определение недостаточно удачно. К счастью, Ньютон привел и способ измерения массы объекта независимо

от закона гравитации, и этот способ выводится с помощью второго из трех законов движения, столь любимых каждым современным студентом-физиком:

1. Каждый предмет пребывает в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не воздействует сила.
2. Предмет массой m подвергается ускорению a при воздействии на него силы F . В форме уравнения это записывается как $F = ma$.
3. Сила действия равна силе противодействия.

Три закона Ньютона – основа для описания движения предметов под воздействием силы. Первый закон описывает то, что происходит с предметом без воздействия сил: предмет либо пребывает в покое, либо движется по прямой линии с постоянной скоростью. Мы поищем эквивалентное утверждение для квантовых частиц чуть позже и не слишком забежим вперед, если скажем, что квантовые частицы никогда не находятся в покое – они прыгают повсюду, даже если никакие силы на них не действуют. Собственно, само понятие силы в квантовой теории отсутствует, поэтому в ней в корзину для бумаг отправлен и второй закон Ньютона. Да-да, именно так: законы Ньютона выброшены в мусорное ведро, потому что оказались лишь приблизительно верными. Они хорошо работают во многих случаях, но полностью неприменимы, когда дело доходит до описания квантовых феноменов. Законы квантовой теории заменяют законы Ньютона, обеспечивая более точное описание мира. Физика Ньютона становится производной квантового описания, так что важно понять: дело обстоит не так, что «ньютоновская механика для крупных предметов, а квантовая – для мелких», – квантовая теория действует всегда.

Хотя нас не очень-то будет интересовать третий закон Ньютона, он заслуживает некоторых комментариев для любителей. Третий закон сообщает, что силы появляются парами: если я стою на Земле и оказываю на нее давление ногами, Земля противодействует в ответ. Таким образом, для «закрытой» системы сумма сил равна нулю, из чего, в свою очередь, следует, что общий импульс системы сохраняется. Мы будем использовать понятие импульса на протяжении всей книги. Для частицы импульс определяется как произведение массы частицы на ее скорость, что записывается как $p = mv$. Интересно, что сохранение импульса действительно имеет некоторый смысл в квантовой теории, даже несмотря на отсутствие в ней понятия силы.

Но сейчас нас интересует второй закон Ньютона.

$F = ma$ означает, что если вы приложите известную силу к предмету и вычислите его ускорение, то отношение силы к ускорению и будет массой предмета. Тут, в свою очередь, предполагается, что мы знаем, как определить силу, но это не так уж сложно. Простой, хотя не очень точный и не очень практичный способ измерения силы, – потянуть предмет чем-то стандартным: допустим, средняя черепаха движется по прямой линии и с помощью ремня тянет за собой какой-то предмет. Назовем ее «Черепаха СИ», запечатаем в коробку и отправим в Международное бюро мер и весов, находящееся в городе Севр, Франция. Две тянущие черепахи будут прикладывать двойную силу, три – тройную и так далее. Таким образом, любые толкающие или тянущие усилия мы можем оценить в количестве средних черепах, которые требуются для их приложения.

Пользуясь этой системой, которая достаточно смехотворна, чтобы ее принял любой международный комитет по стандартам^[3], мы можем просто заставить черепаху тянуть предмет и вычислить его ускорение, что позволит узнать его массу по второму закону Ньютона. После этого можно повторить процесс для второго предмета, вычислить его массу, а затем обе массы подставить в уравнение гравитации, чтобы определить существующую между массами силу притяжения. Но чтобы с помощью количества «черепаших эквивалентов» узнать силу притяжения между двумя массами, нужно откалибровать всю систему под саму силу гравитации, для чего и требуется новый символ – G .

G – это очень важное число, которое называется гравитационной постоянной Ньютона и служит параметром гравитационной силы. Если мы удваиваем G , то мы удваиваем и эту силу, так что яблоко, направляясь к земле, ускоряется в два раза. Таким образом, это число описывает одно из фундаментальных свойств нашей Вселенной, и будь оно иным, мы жили бы в совершенно другой Вселенной. Сейчас полагают, что G имеет одно и то же значение во всей Вселенной и имело это значение во все времена (это число есть и в теории гравитации Эйнштейна, где тоже выступает в роли константы). В этой книге мы встретим и другие универсальные константы Вселенной. В квантовой механике наиболее важной считается постоянная Планка, названная в честь пионера квантовой физики Макса Планка и обозначаемая буквой h . Нам понадобится и скорость света (c), ведь это не только скорость, с которой свет распространяется в вакууме, но и универсальный предел скорости. Вуди Аллен однажды сказал: «Двигаться быстрее скорости света невозможно, да и нежелательно, ведь все время будет слетать шляпа».

Три закона Ньютона и закон притяжения – это все, что нужно

для понимания движения в присутствии гравитации. Нет никаких других скрытых законов, которые мы не упоминали: этих четырех вполне достаточно, и они позволяют нам, например, понять орбиты планет Солнечной системы. Вместе эти законы серьезно ограничивают типы траекторий, по которым предметы могут перемещаться под воздействием притяжения. С помощью одних только законов Ньютона можно доказать, что все планеты, кометы, астероиды и метеоры в нашей Солнечной системе могут двигаться лишь по траекториям, известным как конические сечения. Самая простая из них – та, по которой с очень хорошей точностью движется Земля в своем перемещении вокруг Солнца: это окружность. Но чаще планеты и их спутники движутся по эллиптическим орбитам (эллипсы – это вытянутые окружности). Два других известных конических сечения – парабола и гипербола. Парабола – это траектория движения пушечного ядра при выстреле. Последнее коническое сечение, гипербола, – это траектория, по которой сейчас от нас удаляется по направлению к звездам самый далекий от Земли рукотворный объект в истории. Когда писалась эта книга, «Вояджер-1» находился на расстоянии около 17 610 000 000 км от Земли и удалялся от Солнечной системы со скоростью 538 000 000 км в год. Это прекраснейшее достижение инженерной мысли было запущено в 1977 году и продолжает поддерживать связь с Землей, записывая результаты измерений солнечного ветра на магнитофон и передавая их на Землю с мощностью 20 ватт. «Вояджер-1» и его побратим «Вояджер-2» – вдохновляющие примеры человеческой мечты об исследовании Вселенной. Оба космических корабля посетили Юпитер и Сатурн, а «Вояджер-2» – еще и Уран и Нептун. По Вселенной они передвигались с точным расчетом, используя гравитацию для резких ускорений при проходе между планетами и вылете в межзвездное пространство. При расчете курса на Земле использовались только законы Ньютона, которых оказалось достаточно, чтобы проложить оптимальный путь между внутренними и внешними планетами и далее к звездам. «Вояджер-2» отправится в сторону Сириуса, самой яркой звезды на небе, и окажется там всего через каких-то 300 000 лет. Все это мы сделали, все это мы узнали благодаря теории тяготения Ньютона и его законам движения.

Законы Ньютона обеспечивают интуитивно понятную картину мира. Как мы уже могли заметить, они принимают форму уравнений (математических соотношений между измеримыми величинами), которые позволяют с достаточной точностью предсказывать, как перемещаются объекты. Вся эта система предполагает, что объекты в любой миг где-то

находятся и со временем плавно (без скачков) перемещаются с места на место. Это кажется настолько самоочевидной истиной, что можно бы ее и не комментировать, но на самом деле нужно понять, что это лишь предрассудок. Можно ли быть уверенными, что предметы действительно находятся тут или там и не пребывают в двух разных местах одновременно? Конечно, садовый сарай никак не может находиться в двух совершенно разных местах, это очевидно – но как насчет электрона в атоме? Не может ли он быть одновременно «здесь» и «там»? Прямо сейчас подобное предположение звучит безумно, во многом потому, что мы не можем представить такую картину своему мысленному взору, но со временем вы увидите, что так оно на самом деле и есть. На этой же стадии повествования, делая настолько странное замечание, мы ограничимся указанием на то, что законы Ньютона основаны на интуиции, поэтому, когда дело доходит до фундаментальной физики, они напоминают дом, построенный на песке.

Известен простейший эксперимент, который впервые провели в американской Bell Laboratories Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер и результаты которого были опубликованы в 1927 году. Он доказывает, что интуитивная картина мира Ньютона неверна. Хотя яблоки, планеты и люди действительно ведут себя «по-ньютоновски», перемещаясь с места на место размеренным и предсказуемым образом с течением времени, этот эксперимент показал, что все фундаментальные строительные кирпичики материи действуют совершенно не так.

Работа Дэвиссона и Джермера начинается так: «Интенсивность рассеивания однородного пучка электронов с регулируемой скоростью при прохождении через монокристалл никеля измеряется как функция направления». К счастью, есть способ оценить основное содержание их выводов благодаря упрощенной версии того же эксперимента – так называемому двухщелевому эксперименту. В нем источник испускает электроны в направлении препятствия с двумя маленькими щелями (дырками). С другой стороны препятствия расположен экран, который загорается, когда до него доходит электрон. Каков источник электронов, не так важно, но с практической точки зрения можно представить вытянутый вдоль препятствия провод под напряжением^[4]. Мы изобразили двухщелевой эксперимент на рис. 2.2.

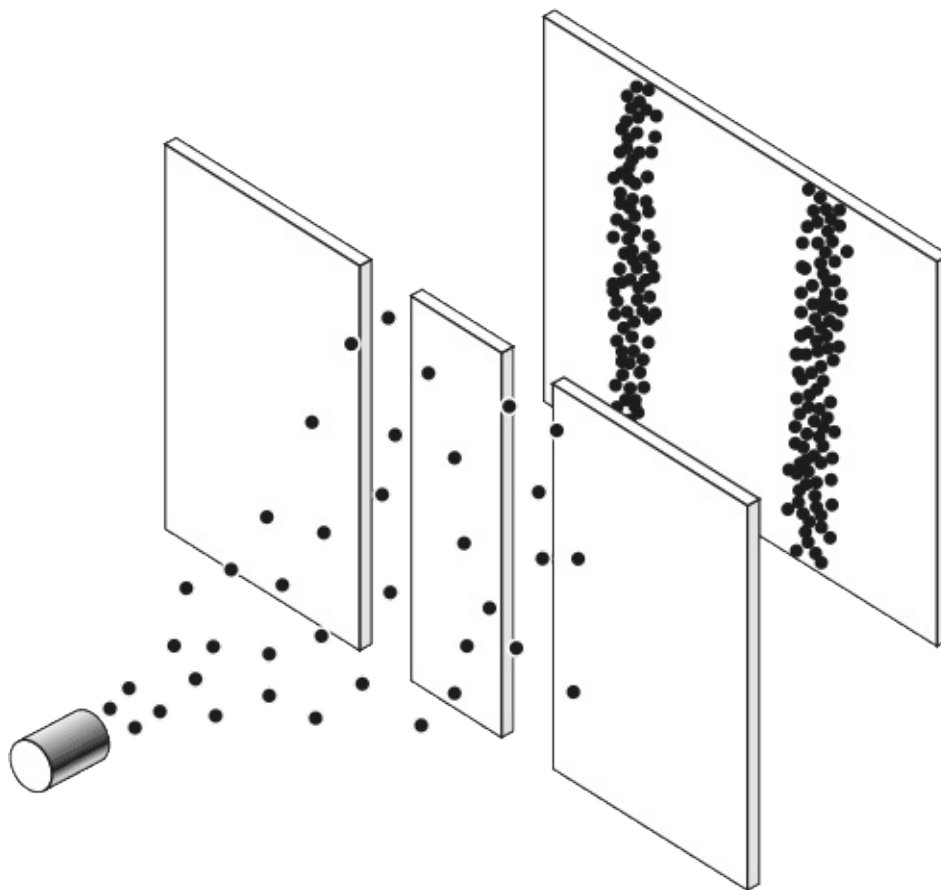


Рис. 2.2. Электронная пушка выстреливает электронами в сторону двух щелей, и если бы электроны вели себя как «обычные» частицы, то можно было бы ожидать, что на экране появится пара полосок, как показано на рисунке. Удивительно, что этого *не* происходит

Представьте, как на экран направляется камера, затвор которой оставляется открытым, чтобы обеспечить долгую выдержку для коротких вспышек света, одна за другой возникающих при попадании электронов на экран. Обязательно формируется некая система, и уместно поинтересоваться, что же это за система. Допустим, электроны – это просто частицы, которые ведут себя так же, как яблоки или планеты. Тогда можно ожидать, что система будет выглядеть примерно так, как на рис. 2.2. Некоторые электроны пройдут сквозь щели, большинству это не удастся. Те, которые проникнут в щель, немного оттолкнутся от ее кромки, что вызовет их рассеяние, но большая часть прошедших электронов, разумеется, появится сразу за двумя щелями – следовательно, это и будет самая яркая часть фотографии.

Этого не происходит. Напротив, получается картина, похожая на рис. 2.3. Полученная структура именно такая, как была представлена

Дэвиссоном и Джермером в статье 1927 года. В 1937 году Дэвиссон получил Нобелевскую премию за «экспериментальное открытие электронной дифракции на кристаллах». Премию он разделил не с Джермером, а с Джорджем Томсоном, который также наблюдал эту структуру, проводя эксперименты в Абердинском университете. Чередующиеся светлые и темные полосы известны как интерференционная картина, а интерференция чаще связана с волнами. Чтобы понять это, давайте мысленно проведем двухщелевой эксперимент не с электронами, а с волнами воды.

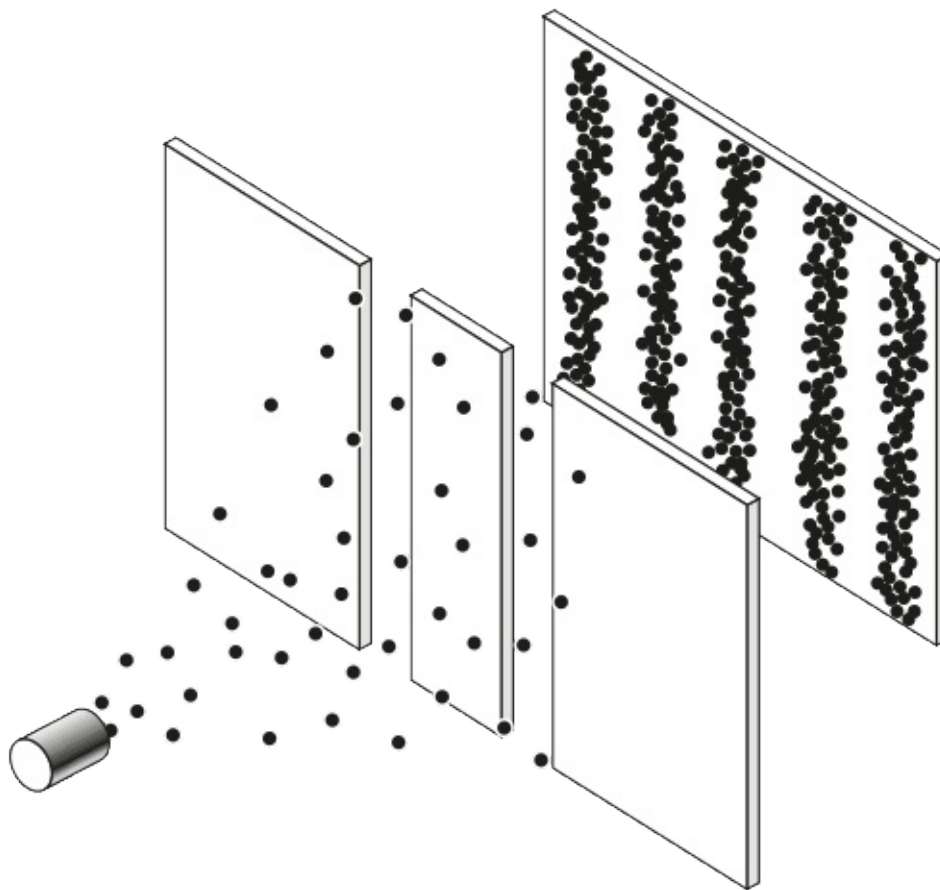


Рис. 2.3. В реальности удары электронов по экрану не связаны со щелями. Вместо этого формируется структура из полосок, которая выстраивается постепенно, электрон за электроном

Представьте цистерну с водой, у которой наполовину опущена стенка с вырезанными в ней двумя щелями. Экран и камеру можно заменить детектором высоты волн, а провод под напряжением – чем-то, создающим волны, например, деревянной доской, положенной вдоль цистерны и снабженной мотором, который заставляет ее погружаться в воду

и выныривать. Созданные таким образом волны будут двигаться по поверхности воды, пока не достигнут стенки. Когда волна ударится о стенку, большая ее часть откатится, но два небольших фрагмента пройдут сквозь щели. Эти две образовавшиеся волны расходятся от щелей по направлению к детектору высоты волн. Заметьте, мы говорим здесь «расходятся», потому что волны отходят от щелей не по прямой. Щели становятся двумя источниками новых волн, каждая из которых расходится увеличивающимися полукругами. Рис. 2.4 показывает, что же происходит.

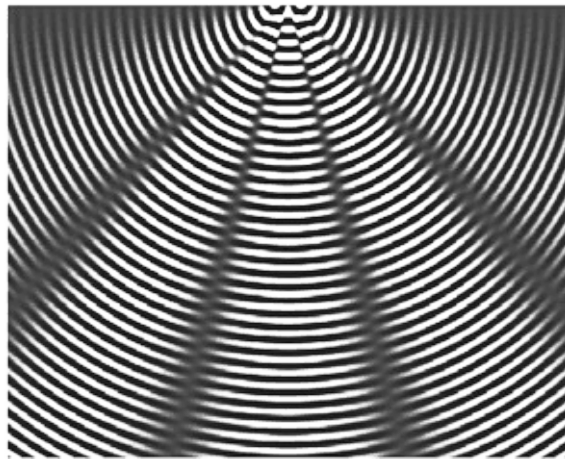


Рис. 2.4. Вид сверху на волны, возникающие из двух точек в цистерне (в верхней части рисунка). Две расходящиеся кругами волны перекрываются и интерферируют. «Спицы» – это те области, где две волны погасили друг друга, и вода осталась спокойной

Этот рисунок – отличная визуальная демонстрация поведения волн воды. Есть области, где волны не возникают вовсе, и кажется, что они отходят от щелей, как спицы от центра колеса, в то время как другие области покрыты взлетами и падениями волн. Параллели со структурой, которую наблюдали Дэвиссон, Джермер и Томсон, поразительны. Вернувшись к электронам, ударяющим в экран, мы видим, что те области, где обнаруживается мало электронов, соответствуют местам в цистерне, где поверхность воды остается спокойной, то есть тем самым спицам, которые отходят от щелей на рисунке.

Довольно легко объяснить, почему такие спицы появляются в цистерне: дело в смещении и слиянии волн, распространяющихся из щелей. Поскольку волны имеют свои взлеты и падения, то две волны при встрече могут «складываться» или «вычитаться». Если встреча двух волн происходит на взлете одной волны и падении другой, происходит

взаимное погашение, и волны в этой точке не будет. В иных случаях волны могут соединяться друг с другом на взлете – в этом случае они образуют более крупную волну. В каждой точке цистерны расстояние между ней и двумя щелями немного разнится, а следовательно, в каких-то местах две волны будут соединяться на своих пиках, в других одна будет на взлете, а другая на спаде, а в большинстве точек соединение будет происходить в каких-то сочетаниях между этими двумя крайними точками. В результате получится чередование – интерференционная картина, или фигура.

При всей наглядности картины понять, что электроны тоже образуют интерференционную фигуру – а это экспериментально наблюдаемый факт, – очень трудно. Согласно Ньютону, а также здравому смыслу, электроны испускаются из источника, направляются по прямым линиям в сторону щелей (поскольку на них не действуют никакие силы – вспомните первый закон Ньютона), проходят сквозь щели с небольшими искривлениями (если цепляют кромку) и продолжают двигаться по прямой вплоть до экрана. Но в таком случае интерференционная фигура не появится – получится пара полосок, как показано на рис. 2.2.

Можно предположить, что существует какой-то хитрый механизм, посредством которого электроны оказывают друг на друга некое воздействие, в результате чего отклоняются от прямых линий, пройдя через щели. Но это легко проверить: можно поставить эксперимент, посылая из источника на экран всего один электрон зараз. Придется подождать – и медленно, но верно, когда электроны один за другим будут врезаться в экран, выработается система полосок. Это крайне удивительно, потому что структура полосок весьма характерна для интерферирующих друг с другом волн, но ведь наш источник испускает зараз по одному электрону – точку за точкой. Хорошее упражнение для ума: попытаться представить, как такое может быть и почему частица за частицей формируют интерференционную фигуру при выстреле в сторону двух щелей в экране. Упражнение тем лучше, что оно совершенно бесплодно: несколько часов ломания головы должны убедить вас, что представить появление структуры полосок совершенно невозможно. Какими бы ни были испускаемые частицы, они точно не «обычные» частицы. Электроны словно бы «интерферируют сами с собой». Наша задача – создать теорию, которая может объяснить происходящее.

У этой истории есть интереснейшее историческое завершение, которое показывает, какие проблемы интеллектуального плана ставит двухщелевой эксперимент. Джозеф Томсон, получивший Нобелевскую премию за открытие электрона в 1899 году, показал, что электрон – это частица

с определенным электрическим зарядом и определенной массой, маленькая песчинка материи. Его сын Джордж Томсон 40 лет спустя получил Нобелевскую премию за доказательство того, что электрон ведет себя не так, как ожидал его отец. Томсон-старший не был неправ: у электрона действительно есть четко определенная масса и электрический заряд, и каждый раз, когда мы его видим, он кажется нам крупинкой материи. Однако он не ведет себя *в точности* как крупинка материи, что обнаружили Дэвиссон, Джермер и Томсон-младший. Важно заметить, что не ведет он себя и *в точности* как волна, потому что интерференционная фигура не формируется каким-то плавным добавлением энергии; скорее, она состоит из множества мельчайших точек. Мы всегда можем обнаружить точечные электроны, какими представлял их Томсон-старший.

Возможно, вы уже видите необходимость прибегнуть к предложенному Гейзенбергом способу мышления. То, что мы наблюдаем, – это частицы, поэтому нужно создавать теорию частиц. Наша теория должна к тому же уметь предсказывать появление интерференционных фигур, получающихся, когда электроны один за другим проходят сквозь щели и врезаются в экран. Подробностей того, как электроны движутся от источника к щелям и затем к экрану, мы наблюдать не можем, поэтому им необязательно согласовываться с тем, с чем мы имеем дело в повседневной жизни. И действительно, о «путешествии» электрона можно даже вообще не вести речь. Все, что нам нужно, – выработать теорию, способную предсказать, что электроны при контакте с экраном образуют фигуру, которая получается в ходе двухщелевого эксперимента. Это мы и сделаем в следующей главе.

Чтобы вы не думали, что это просто увлекательный образчик физики микромира, который имеет мало отношения к миру в целом, нужно сказать, что квантовая теория частиц, которую мы разрабатываем для объяснения двухщелевого эксперимента, окажется способной объяснить и стабильность атомов, и цвет лучей, испускаемых химическими элементами, и радиоактивный распад, да, собственно, и все великие тайны, волновавшие ученых в начале XX века. То, что наша система описывает способ поведения электронов, заключенных внутри материи, позволит понять и то, как работает едва ли не самое важное изобретение XX века – транзистор.

В самой последней главе этой книги мы увидим поразительное применение квантовой теории, демонстрирующее силу научной аргументации. Самые необычные предсказания квантовой теории обычно

проявляются в поведении малых объектов. Но поскольку большие объекты состоят из малых, при определенных обстоятельствах квантовая физика требуется для объяснения свойств одних из самых крупных объектов во Вселенной – звезд. Наше Солнце ведет постоянную борьбу с силой притяжения. Этот газовый шар, в три миллиона раз более массивный, чем наша планета, обладает силой притяжения почти в 28 раз больше, чем Земля, что ставит его под постоянную угрозу коллапса. Ситуация предотвращается направленным вовне давлением, которое создают реакции ядерного синтеза в самом солнечном ядре, где каждую секунду 600 000 000 т водорода превращаются в гелий. Но как бы ни была велика наша звезда, столь интенсивное сжигание топлива должно иметь свои последствия, и в один прекрасный день источник топлива на Солнце прекратит свое существование. Давление, направленное вовне, прекратится, и железной хватке гравитации нечего будет противопоставить. И тогда, кажется, ничто во Вселенной не сможет предотвратить катастрофу.

На самом же деле в игру вступит квантовая физика и решит проблему. Звездам придут на помощь квантовые эффекты: они станут так называемыми белыми карликами – таков и будет финал нашего Солнца. В конце этой книги мы применим понимание квантовой механики для расчета максимальной массы звезды – белого карлика. Впервые ее рассчитал в 1930 году индийский астрофизик Субраманьян Чандрасекар, и выяснилось, что эта масса составляет примерно 1,4 массы Солнца. Как ни удивительно, это число можно получить, зная лишь массу протона и значения трех уже известных нам констант природы – гравитационной постоянной Ньютона, скорости света и постоянной Планка.

Развитие самой квантовой теории и измерение этих четырех величин, разумеется, никак не зависит от наблюдений за звездами. Можно представить себе цивилизацию агорафобов, живущих в глубоких пещерах под поверхностью своей планеты. Они не имеют никакого представления о небе, но могут разработать квантовую теорию. Просто для собственного удовольствия в один прекрасный день они могут решить вычислить максимальную массу гигантского газового шара. Представьте, как однажды отважный исследователь решает в первый раз выбраться на поверхность и в восторге смотрит на небо, полное огней; галактики из сотен миллиардов звезд, протянувшихся от горизонта до горизонта. Этот исследователь обнаружит, как обнаружили мы с нашего наблюдательного пункта на Земле, что среди множества затухающих останков умирающих звезд нет ни одной, чья масса превышала бы предел Чандрасекара.

3. Что такое частица?

Пионером нашего подхода к квантовой теории считается Ричард Фейнман, лауреат Нобелевской премии и нью-йоркский барабанщик, которого его друг и соавтор Фримен Дайсон охарактеризовал как «наполовину гений, наполовину шут». Впоследствии Дайсон изменил свое мнение: более точно было бы назвать Фейнмана «полным гением и полным шутом». Мы будем придерживаться в книге именно его подхода, потому что, во-первых, это весело, а во-вторых, это едва ли не простейший способ понять нашу квантовую Вселенную.

Помимо авторства самой простой формулировки квантовой механики, Ричард Фейнман был также прекрасным педагогом, способным перенести свое глубокое понимание физики на страницы или в лекционную аудиторию с несравненной ясностью и минимумом суеты. Его стиль изложения совершенно не походил на стиль тех, кто хотел бы сделать физику сложнее, чем она должна быть. И все же в самом начале своей классической серии вузовских учебников «Фейнмановские лекции по физике» он посчитал важным сразу же честно предупредить, что квантовая теория противоречит человеческой интуиции. Фейнман писал, что субатомные частицы «не ведут себя как волны, как частицы, как бильярдные шары, как пружинные весы, как то, что вы могли видеть». Что ж, попытаемся построить модель того, как они все-таки себя ведут.

Для начала предположим, что элементарные строительные кирпичики природы – это частицы. Это подтверждается не только двухщелевым экспериментом, в котором электроны всегда прибывают в конкретные места экрана, но и множеством других исследований. И действительно, «физика частиц» не зря так называется. Нужно решить следующий вопрос: как перемещаются частицы? Конечно, проще всего предположить, что они двигаются по идеально прямым линиям или же по кривым, если на них действуют силы согласно законам Ньютона. Однако это не может быть верным, потому что любое объяснение двухщелевого эксперимента предполагает, что электроны «интерферируют друг с другом», проходя через щели, а для этого они должны каким-то образом рассеиваться. Итак, проблема – создать такую теорию точечных частиц, чтобы эти частицы еще и рассеивались. Но задача не так нереальна, как кажется: это можно сделать, если «позволить» каждой частице находиться *одновременно в нескольких местах*. Конечно, это опять-таки кажется невозможным,

но предположение о том, что частица может находиться в нескольких местах одновременно, по крайней мере, довольно ясное, даже если звучит весьма глупо. С этого момента мы будем называть такие частицы – противоречащие интуиции, рассеянные, но при этом точечные – *квантовыми*.

Высказав предположение, что «частица может одновременно находиться более чем в одном месте», мы отрываемся от повседневного опыта и вступаем на неизведанную территорию. Одно из главных препятствий для развития понимания квантовой физики – смятение, порождаемое таким способом мышления. Чтобы его избежать, нужно следовать за Гейзенбергом и учиться спокойно мириться с взглядами на мир, идущими вразрез с житейским опытом. «Неудобство» теории часто ошибочно принимается за смятение, и нередко изучающие квантовую физику продолжают пытаться понять происходящее с точки зрения повседневного опыта. Но к смятению ведет сопротивление новым идеям, а не внутренняя сложность самих идей, потому что реальный мир попросту устроен не так, как подсказывает нам повседневный опыт. И поэтому нужно подходить к делу с непредубежденным умом и не смущаться кажущейся странностью. Это понимал даже Шекспир – его Гамлет говорит: «Как к чудесам, вы к ним и отнеситесь. Гораций, много в мире есть того, что вашей философии не снилось»^[5].

Хороший способ начать – тщательно поразмыслить над версией двухщелевого эксперимента для волн воды. Наша цель – выяснить, что же в волнах вызывает появление интерференционной фигуры. Мы должны убедиться, что теория квантовых частиц включает такое же поведение и мы сможем попытаться объяснить двухщелевой эксперимент и для электронов.

Волны, проходящие через две щели, могут интерферировать друг с другом по двум причинам. Первая: волна проходит через *обе щели одновременно*, создавая две новые волны, которые отклоняются и смешиваются. Очевидно, что волна может себя так вести. У нас нет ни малейших проблем с тем, чтобы представить себе одну длинную океанскую волну, которая накатывает на берег и разбивается о пляж. Это стена воды – распростертая, не стоящая на месте. Таким образом, надо понять, как сделать такой же «распростертой, не стоящей на месте» нашу частицу. Вторая причина в том, что две новые волны, отходящие от щелей, могут при смешивании либо добавляться друг к другу, либо ослаблять действие друг друга. Эта способность двух волн интерферировать, очевидно, и будет ключевой для объяснения появления интерференционной фигуры. Крайний случай – совпадение максимума одной волны

с минимумом другой. В этом случае они полностью погасят друг друга. Поэтому мы сталкиваемся с необходимостью заставить нашу квантовую частицу каким-то образом интерферировать саму с собой.

Двухщелевой эксперимент связывает поведение электронов с поведением волн, поэтому давайте посмотрим, насколько далеко может зайти это соответствие. Посмотрим на рис. 3.1, сначала проигнорировав линии, соединяющие точки A с E и B с F , и сосредоточимся на волнах.

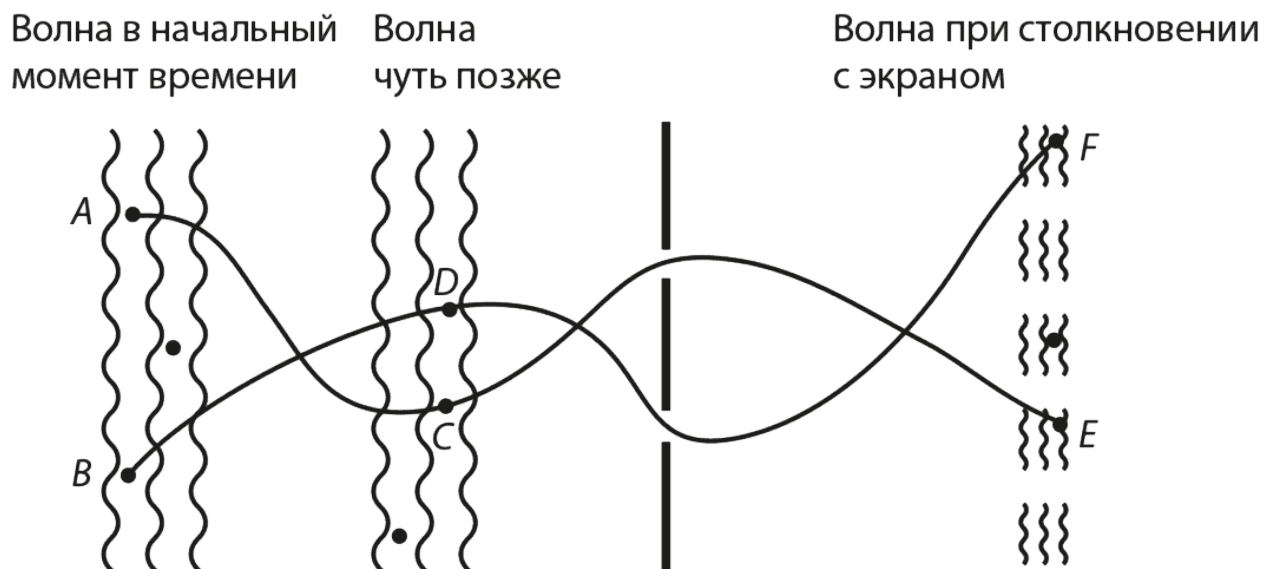


Рис. 3.1. Как волна, описывающая поведение электрона, движется от источника к экрану и как ее нужно интерпретировать в качестве представления всех вариантов траекторий электрона. Пути от A до C и E и от B до D и F иллюстрируют всего лишь две из бесконечного множества траекторий, по которым может двигаться одиночный электрон

Наш рисунок может описывать цистерну с водой. Тогда волнистые линии представляют – слева направо – то, как водяная волна катится через цистерну. Допустим, мы сфотографировали цистерну сразу после того, как деревянная доска слева ударила по воде, вызвав волну. На фотографии будет видна новообразованная волна, простирающаяся сверху вниз. Вся остальная вода в цистерне остается спокойной. На второй фотографии, сделанной чуть позже, видно, как водяная волна двигается к щелям, оставляя за собой ровную поверхность. Еще позже волна проходит через пару щелей и создает полосатую интерференционную фигуру, которую иллюстрируют волнистые линии в правом углу.

А сейчас давайте перечитаем последний абзац, только вместо «водяной волны» подставим «электронную волну», что бы это ни значило.

Электронная волна, если ее интерпретировать должным образом, может объяснить ту полосатую фигуру, которую мы хотим понять, потому что в эксперименте она ведет себя так же, как волна воды. Но осталось объяснить, почему же электронная фигура получается из точек, когда электроны попадают на экран один за другим. На первый взгляд, это противоречит идее гладкой волны, но на самом деле это не так. Нужно догадаться, что мы можем предложить следующее объяснение: электронную волну следует интерпретировать не как реальное материальное возмущение (как в случае с волной воды), а как некий способ информирования нас о том, где, вероятно, электрон будет обнаружен. Заметьте, мы говорим «электрон», а не «электроны», потому что волна должна описать поведение одиночного электрона – таким образом мы получим возможность объяснить, откуда же берутся эти точки. Это электронная волна, а не волна электронов, и тут нельзя ошибаться. Если мы представим себе снимок волны в какой-то момент времени, то возникнет мысль интерпретировать его следующим образом: там, где волна наибольшая, существует наибольшая вероятность найти электрон, а там, где волна меньше всего, вероятность встретить наш электрон наименьшая. Когда волна наконец достигает экрана, там появляется маленькая точка, которая и сообщает о его местонахождении. Единственная задача электронной волны – дать нам возможность вычислить шансы на то, что электрон попадет в определенную точку экрана. Если же не беспокоиться, чем в действительности «является» электронная волна, то все сразу становится ясным, потому что как только мы рассчитаем волну, то сразу сможем сказать, где, скорее всего, располагается электрон. Самое интересное начинается позже, когда мы пытаемся понять, как связано наше предположение по поводу электронной волны с путешествием электрона от щели к экрану.

Но прежде чем мы приступим, полезно будет еще раз перечитать предыдущий абзац, потому что он очень важен. То, что в нем излагается, совершенно не очевидно и уж точно не соответствует интуиции. У предположения об «электронной волне» есть все необходимые свойства, чтобы объяснить появление наблюдаемой при эксперименте интерференционной фигуры, но в целом это типичная догадка о том, как это может происходить на самом деле. Как хорошие физики, мы должны рассмотреть последствия и выяснить, насколько эта догадка согласуется с природой.

Вернемся к рис. 3.1. Мы предположили, что в каждый момент времени

электрон описывается волной – такой же, как водяная. В первый момент электронная волна находится слева от щелей. Это значит, что наш электрон в каком-то смысле где-то внутри волны. Позднее волна продвигается к щелям, так же как водяная, и электрон оказывается где-то в составе новой волны. Мы говорим, что электрон «может быть сначала в *A*, а потом в *C*», или «сначала в *B*, а потом в *D*», или же «сначала в *A*, а потом в *D*» и т. д. Зафиксируйте ненадолго эту мысль и подумайте теперь о еще более позднем времени после того, как волна прошла через щели и достигла экрана. Сейчас электрон можно обнаружить в *E* или, возможно, в *F*. Кривые, которые мы изобразили на диаграмме, отображают две возможные траектории, по которым электрон мог двигаться от своего источника через щели в сторону экрана. Он мог отправиться от *A* через *C* в *E* или от *B* через *D* в *F*. И это всего две траектории из бесконечного числа возможных для этого электрона.

Важно, что нет никакого смысла говорить: «Электрон мог проследовать любым из этих маршрутов, но на самом деле он двигался только одним из них». Если решить, что электрон действительно шел по одной конкретной траектории, то у нас будет не больше шансов на объяснение появления интерференционной фигуры, чем если бы мы закрыли одну из щелей в эксперименте с водой. Нам нужно, чтобы волна могла пройти через обе щели – только так мы получим интерференционную фигуру. Значит, нужно разрешить все возможные траектории движения электрона от источника к экрану. Иными словами, под выражением «электрон где-то в волне» мы имели в виду, что он одновременно находится во всей волне! Именно так мы и должны думать, потому что, если мы считаем, что электрон действительно находится в каком-то конкретном месте, волна утрачивает распределенность в пространстве, и мы теряем аналогию с водяной волной. В результате интерференционная фигура остается без объяснения.

Здесь, возможно, снова имеет смысл перечитать приведенные выше рассуждения, потому что из них следует многое из того, что говорится ниже. И это не какая-то ловкость рук: мы утверждаем, что нам нужно описать распространяющуюся волну, которая при этом считается также точечным электроном, и единственный способ сделать это – заявить, что электрон перемещается от источника к экрану всеми возможными траекториями сразу.

Соответственно, мы должны описывать одиночный электрон, движущийся от источника к экрану по бесконечному разнообразию маршрутов, как электронную волну. Иными словами, правильный ответ

на вопрос «Как этот электрон добрался до экрана?» звучит так: «Он попал туда бесконечно возможными способами, некоторые из них предполагают прохождение через верхнюю щель, а некоторые – через нижнюю». Определенно, этот электрон – не обычная частица. Это *квантовая частица*.

Определившись с тем, что описание электрона во многих отношениях подражает поведению волн, мы должны выработать более точные понятия о самих волнах. Начнем с описания того, что происходит в цистерне с водой, когда две волны встречаются, смешиваются и интерферируют друг с другом. Для этого необходимо найти удобный способ представления положений взлетов и падений каждой волны. На техническом жаргоне эти положения называются фазами. Обычно говорят, что волны «в фазе», если они усиливают друг друга, или «в противофазе», если они отменяют друг друга. То же слово применяется по отношению к Луне: в течение примерно 28 дней Луна проходит путь от новолуния до полнолуния и обратно в непрерывном цикле возрастания и убывания. Этимология слова «фаза» восходит к греческому *phasis*, которое означает появление и исчезновение астрономического феномена, а регулярное появление и исчезновение яркой лунной поверхности за 20 веков привело к тому, что слово «фаза» стало использоваться при обозначении всего циклического.

И это подсказывает нам возможность графического отображения положения взлетов и падений водяных волн.

Взгляните на рис. 3.2. Один из способов отобразить фазу – представить ее в виде циферблата с единственной стрелкой. Это позволяет нам визуально представить 360-градусный круг возможностей: стрелка часов может указывать на 12 часов, на 3 часа, на 9 часов и на все промежуточные стадии. В случае с Луной можно представить, что новолунию соответствует стрелка на 12 часах, неомении – на 1:30, первой четверти – на 3, растущей Луне – на 4:30, полной Луне – на 6 и т. д. Здесь мы используем нечто абстрактное для описания чего-то конкретного, то есть циферблат для фаз Луны. Таким образом, при изображении циферблата со стрелкой на 12 часах вы сразу поймете, что на рисунке представлено новолуние. И даже если это специально не оговорено, увидев стрелку на 5 часах, вы догадаетесь, что приближается полнолуние. Применение абстрактных рисунков, или символов, для отражения реальных вещей очень характерно для физики: собственно, для того физики и используют математику. Сила такого подхода в том, что, оперируя абстрактными рисунками с помощью простых правил, можно делать уверенные предсказания о реальном мире. Как мы сейчас увидим, циферблаты как раз дают такую возможность, потому что могут

фиксировать относительные положения взлетов и падений волн. Это, в свою очередь, позволит вычислить, будут волны усиливать или отменять друг друга при наложении.



Рис. 3.2. Фазы Луны

На рис. 3.3 изображены две водяные волны в определенный момент времени. Представим максимумы волн в виде циферблатов со стрелкой

на 12 часов, а минимумы – в виде циферблатов со стрелкой на 6. Мы можем отобразить и промежуточные между минимумом и максимумом положения волн, нарисовав циферблаты с промежуточным временем, как и в случае с фазами между новой и полной Луной. Расстояние между последовательными взлетами и падениями – важная величина; она известна как *длина волны*.

.

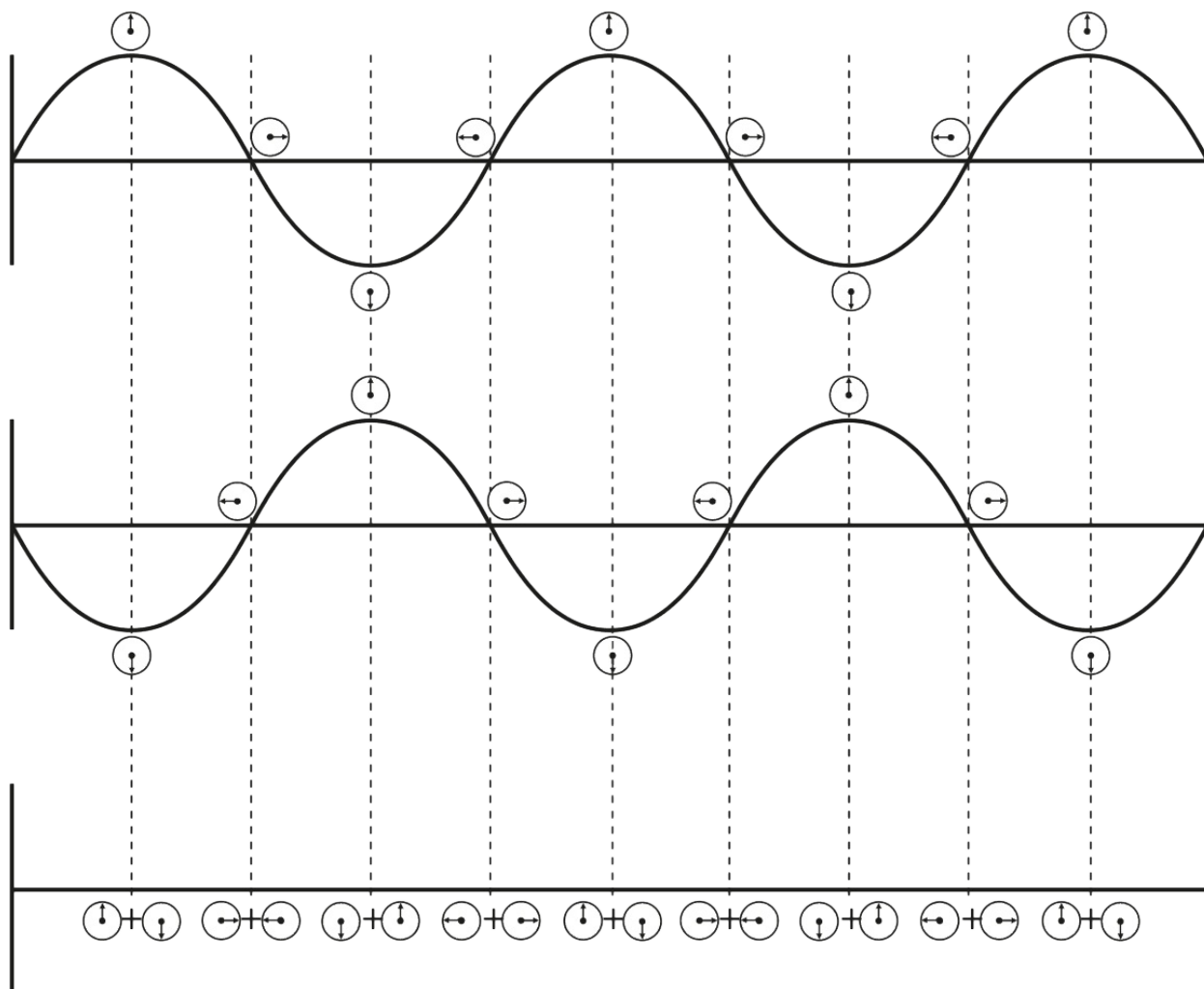


Рис. 3.3. Две волны расположены так, что полностью нейтрализуют друг друга. Верхняя и нижняя волна находятся в противофазе, то есть максимумы одной соответствуют минимумам другой. Когда эти волны складываются, они гасят друг друга, что и показывает «волна» внизу в виде прямой линии

Две волны на рис. 3.3 находятся в противофазе, то есть максимумам верхней волны соответствуют минимумы нижней волны, и наоборот. В результате, разумеется, они при сложении полностью погасят друг друга. Это показано в нижней части рисунка, где волна становится совершенно прямолинейной. Если говорить о циферблатах, то все 12-часовые циферблаты верхней волны, отображающие ее пики, соответствуют 6-часовым циферблатам нижней волны, отображающим ее минимумы. Собственно, везде стрелки на циферблатах верхней волны указывают в сторону, противоположную циферблатам нижней волны.

На этом этапе кажется, что ввод циферблатов для описания волн –

излишнее усложнение.

Конечно, если мы хотим сложить две волны воды, то все, что нужно, – сложить высоты каждой из волн, для чего никаких циферблатов не требуется. Да, для обычных водяных волн это верно, но мы не сумасшедшие и ввели циферблаты, имея на то свои основания. Очень скоро обнаружится, что гибкость, достигнутая с их помощью, совершенно необходима, когда дело дойдет до квантовых частиц.

Держа это в уме, ненадолго остановимся и попробуем сформулировать точное правило сложения циферблатов. В случае на рис. 3.3 правило должно выглядеть так, что все циферблаты «взаимно отменяются», так что ничего не остается: 12 часов отменяет 6 часов, 3 часа отменяет 9 часов и т. д. Такая совершенная взаимная нейтрализация, разумеется, отражает тот особый случай, когда волны находятся в идеальной противофазе. Попробуем найти общее правило, работающее для сложения волн любого расположения и любой формы.

На рис. 3.4 показаны еще две волны, на этот раз соединяющиеся по-другому: одна немного смещена относительно другой. Мы вновь отметили максимумы, минимумы и промежуточные точки циферблатами. Сейчас 12-часовой циферблат верхней волны соответствует трехчасовому циферблату нижней. Мы попытаемся сформулировать правило, которое позволит складывать эти циферблаты. Оно состоит в том, что нужно взять две стрелки и соединить их головкой и хвостом. После этого достраиваем треугольник, рисуя новую стрелку, которая сводит вместе две предыдущие. Пример приведен на рис. 3.5. Новая стрелка отличается по длине от двух других и указывает в другом направлении; это новый циферблат, отображающий сумму двух предыдущих.

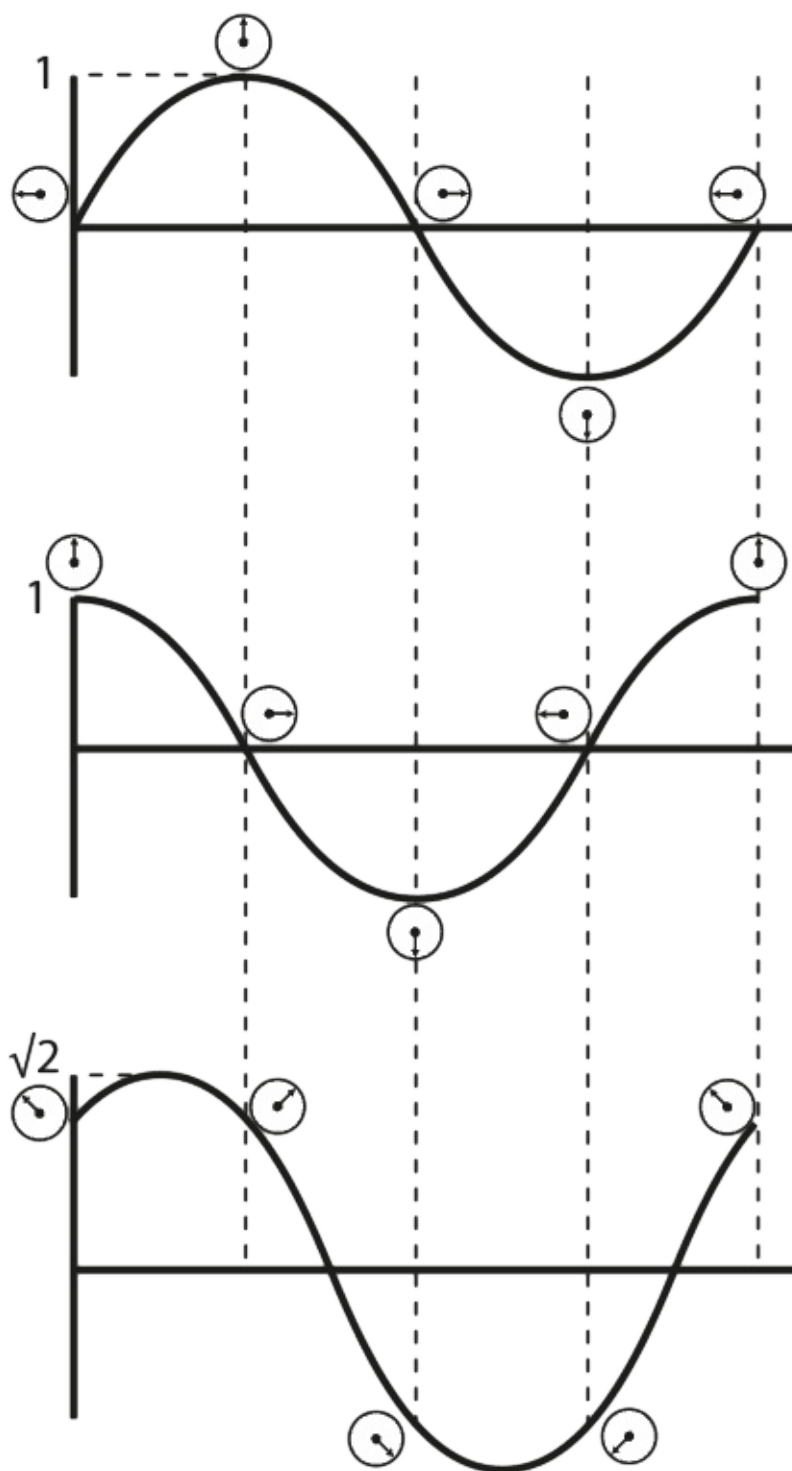


Рис. 3.4. Две волны смещены относительно друг друга. Верхняя и средняя волны складываются, образуя нижнюю волну

Теперь можно добиться большей точности и с помощью простой тригонометрии вычислить результаты сложения любой конкретной пары

циферблатов. На рис. 3.5 мы складываем 12-часовой и 3-часовой циферблаты. Допустим, длина стрелок двух первых циферблатов – 1 см (что соответствует максимальной высоте волны – 1 см). Когда мы сводим стрелки головкой к хвосту, получается прямоугольный треугольник, две стороны которого имеют длину 1 см каждая. Стрелка нового циферблата будет иметь длину третьей стороны треугольника – гипотенузы. Теорема Пифагора гласит, что квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов: $h^2 = x^2 + y^2$. Подставляем числа: $h^2 = 1^2 + 1^2 = 2$. Итак, длина новой стрелки циферблата h будет равняться квадратному корню из 2, то есть примерно 1,414 см. В каком направлении будет указывать эта новая стрелка? Для этого нужно узнать величину угла треугольника, отмеченного на рисунке буквой θ . В нашем примере, когда две стрелки одинаковой длины, одна из которых указывает на 12, а другая на 3, можно найти ответ и без всякой тригонометрии. Очевидно, что гипотенуза образует угол 45° , так что новое «время» будет находиться между 12 и 3 часами – это половина второго. Конечно, такой пример – особенный случай. Мы выбрали такие циферблаты, чтобы их стрелки располагались под прямыми углами и имели одинаковую длину, а это упрощает математику. Но очевидно, что можно вычислить длину стрелки и получающееся время при сложении любой пары циферблатов.

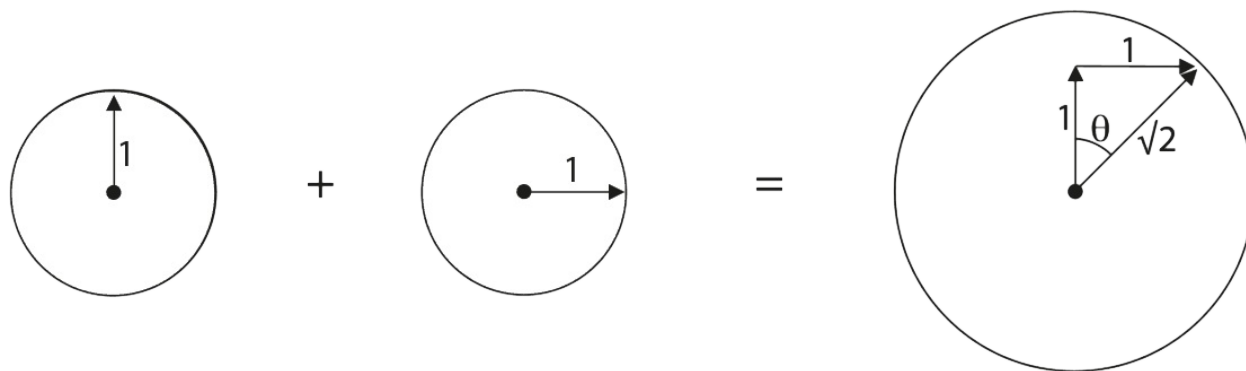


Рис. 3.5. Правило сложения циферблатов

Теперь вернемся вновь к рис. 3.4. Для любой точки на маршруте новой волны мы можем вычислить высоту волны, сложив циферблаты по приведенному выше правилу и задавшись вопросом, насколько стрелка нового циферблата близка к 12-часовому направлению. Когда стрелка указывает на 12, все очевидно: высота волны попросту равна длине стрелки. Точно так же, когда стрелка направлена на 6, все очевидно: волна находится на минимуме, и ее глубина равна длине стрелки. Все понятно

и в том случае, когда на часах 3 или 9, потому что высота волны равна нулю, ведь стрелка часов находится под прямым углом к 12-часовому направлению. Чтобы вычислить высоту волны, которую описывает тот или иной циферблат, нужно умножить длину стрелки h на косинус угла, который эта стрелка образует с направлением на 12 часов. Например, угол, который образуют направления на 3 и на 12 часов, равен 90° , а $\cos 90^\circ$ равен нулю, так что высота волны тоже равна нулю. Половина второго соответствует углу в 45° , а $\cos 45^\circ$ – примерно 0,707, так что высота волны составляет 0,707 от длины стрелки (заметьте, что 0,707 – это $1 / \sqrt{2}$!). Если ваших познаний в тригонометрии недостаточно, чтобы понять несколько последних предложений, можно смело игнорировать эти подробности. Важен принцип: зная длину стрелки часов и ее направление, вы можете вычислить высоту волны – и даже если не понимаете тригонометрию, легко справитесь, тщательно нарисовав стрелки часов и спроецировав их на 12-часовое направление с помощью чертежной линейки. (Здесь мы хотели бы уточнить, что всем читающим эту книгу студентам такой способ действий не рекомендуется: синусы и косинусы знать полезно.)

Таково правило сложения циферблатов, и оно прекрасно работает, как показывает нижняя из трех картинок на рис. 3.4, где мы систематически применяли это правило для различных точек на волнах. В этом описании водяных волн все, что имеет значение, – проекция «времени» на 12-часовое направление, связанная с единственным параметром – высотой волны.

Вот почему использование циферблатов не так уж необходимо при описании водяных волн. Взгляните на три циферблата на рис. 3.6: все они соответствуют одной и той же высоте волны и дают эквивалентные способы представления одной и той же высоты воды. Но циферблаты эти, разумеется, различны, и, как мы увидим, эти различия имеют значение, если использовать их для описания квантовых частиц, потому что в этом случае длина стрелки циферблата (или размер циферблата, что одно и то же) имеют очень важное истолкование.

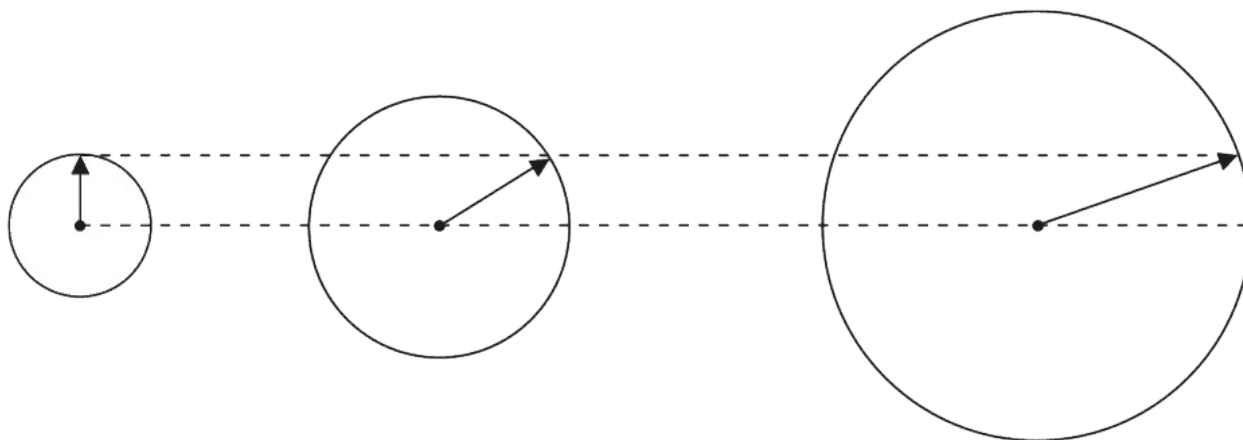


Рис. 3.6. Три разных циферблата с одной и той же проекцией на 12-часовое направление

В некоторых местах этой книги, и особенно в этом, мы будем иметь дело с абстракциями. Чтобы не поддаться головокружительному беспорядку, нужно помнить об общей картине. Экспериментальные результаты Дэвиссона, Джермера и Томсона и сходство полученных данных с поведением водяных волн вдохновили нас на следующий анзац: частицу следует представить в виде волны, а сама волна может быть изображена в виде множества циферблатов. Мы представляем, как электрон распространяется «подобно водяной волне», но пока не дали подробного объяснения, что же происходит. Пока нам важна только сама аналогия с водяными волнами и понимание того, что электрон в любой момент может быть описан как волна, которая распространяется и интерферирует подобно водяным волнам. В следующей главе постараемся с большей точностью описать, как перемещается электрон с течением времени. Помогать нам в этом будут различные бесценные идеи, включая знаменитый принцип неопределенности Гейзенберга.

Но прежде потратим немного времени на обсуждение циферблатов, с помощью которых мы представляем электронную волну. Подчеркиваем, что эти циферблаты ни в коем смысле нельзя считать реальными, а часовая стрелка не имеет никакого отношения ко времени суток. Идея использовать множество микроскопических циферблатов для описания реального физического феномена не так уж нелепа, как это может показаться. Подобные технические приемы для описания природных явлений используют многие физики, и мы уже видели, как это работает при описании водяных волн.

Еще один пример подобного абстрагирования – описание температуры в комнате, которое может быть представлено в виде числового множества.

Числа не существуют как физические объекты, и это роднит их с нашими циферблатами. Множество чисел и их связь с точками в комнате – просто удобный способ представления температуры. Физики называют такую математическую структуру полем. *Температурное поле* – просто числовое множество, одно число для одной точки. В случае с квантовыми частицами поле обладает большей сложностью, потому что для каждой точки требуется не просто число, а целый циферблат. Такое поле обычно называется волновой функцией частицы. То, что нам для создания волновой функции требуется ряд циферблатов, хотя для температурного поля или волн воды достаточно числа, демонстрирует существенную разницу. На физическом жаргоне циферблаты появляются потому, что волновая функция – это «комплексное» поле, а температура или высота водяной волны – «действительное» поле. Но нам подобный язык не пригодится, потому что мы можем работать с циферблатами^[6].

Не стоит беспокоиться по поводу отсутствия непосредственных способов почувствовать волновую функцию, в отличие от температурного поля. То, что мы не можем ее осязать, нюхать или видеть непосредственно, никакого значения не имеет. Честно говоря, мы бы немногого добились в физике, если бы решили ограничить себя описанием тех вещей во Вселенной, которые можем воспринимать непосредственно.

При обсуждении двухщелевого эксперимента с электронами мы говорили, что электронная волна будет самой большой там, где электрон находится с наибольшей вероятностью. Эта интерпретация позволила осознать, как полосатая интерференционная фигура может создаваться постепенно, точка за точкой, по мере прибытия электронов. Но сейчас это утверждение для наших целей уже недостаточно точное. Мы хотим знать, какова вероятность обнаружить электрон в конкретной точке; мы хотим измерить эту вероятность каким-либо числом. Здесь-то и возникает потребность в циферблатах, потому что та вероятность, которую мы хотим найти, не просто высота волны. Правильно будет интерпретировать *квадрат* длины стрелки как вероятность найти частицу в конкретном месте циферблата. Вот почему необходима та дополнительная гибкость, которую и дают циферблаты по сравнению с обычными числами. Эта интерпретация, разумеется, не совсем очевидна, и у нас нет хорошего объяснения ее правильности. Мы знаем, что она правильна, потому что ведет к предсказаниям, согласующимся с экспериментальными данными. Такая интерпретация волновой функции – один из самых трудных вопросов, с которыми сталкивались первопроходцы в области квантовой теории.

Волновая функция (то есть наш набор циферблатов) была введена в квантовую теорию серией работ, опубликованных в 1926 году австрийским физиком Эрвином Шрёдингером. Его статья, вышедшая 21 июня, содержит уравнение, которое должно накрепко засесть в голове у каждого студента-физика. Совершенно логично, что оно получило название уравнения Шрёдингера:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi.$$

Греческая буква Ψ (произносится «пси») обозначает волновую функцию, и уравнение Шрёдингера показывает, как эта функция изменяется с течением времени. Детали уравнения не нужны для наших целей, потому что мы не собираемся использовать в книге подход Шрёдингера. Интересно, что, хотя Шрёдингер и записал правильное уравнение волновой функции, вначале он дал ему неверное толкование. Лишь Макс Борн, один из старейших на 1926 год физиков, работавших в области квантовой теории (он находился в почтенном возрасте 43 лет), дал верную интерпретацию уравнения в статье, вышедшей спустя всего четыре дня после работы Шрёдингера. О возрасте мы заговорили потому, что в середине 1920-х годов квантовая теория имела прозвище *Knabenphysik* – «мальчишеская физика», потому что многие из ее ключевых деятелей были молоды. В 1925 году Гейзенбергу было 23, Вольфгангу Паули, со знаменитым принципом которого мы встретимся позже, исполнилось 22, как и Полю Дираку, британскому физiku, который первым вывел уравнение, верно описывающее электрон. Часто говорят, что молодость освободила их от старых способов мышления и позволила полностью отдаться радикально новой картине мира, которую предоставляла квантовая теория. В этой компании 38-летний Шрёдингер был стариком, и он действительно так до конца и не освоился с той теорией, в разработке которой сыграл ключевую роль.

Радикальная интерпретация волновой функции, за которую Борн получил Нобелевскую премию по физике в 1954 году, выглядела так: квадрат длины стрелки часов в определенной точке соответствует вероятности нахождения в ней частицы. Например, если длина часовой стрелки, находящейся в определенном месте, равна 0,1, то ее квадрат будет равняться 0,01. Это значит, что вероятность найти в этом месте частицу

будет составлять 0,01, то есть одну сотую. Вы можете спросить, почему Борн просто не возвел в квадрат размеры циферблатов, чтобы в последнем примере длина стрелки часов сама приняла значение 0,01? Но это не сработало бы из-за необходимости расчета интерференции: если сложить значения циферблатов, то 0,01 плюс 0,01 даст 0,02, в то время как сложение 0,1 и 0,1 и последующее возведение суммы в квадрат даст 0,04.

Эту ключевую для квантовой теории идею можно проиллюстрировать еще одним примером. Допустим, мы делаем с частицей нечто, из-за чего она может быть описана с помощью конкретного множества циферблатов. Допустим также, у нас есть прибор, способный измерять местоположение частиц. Такое легко вообразимое, но не так уж легко конструируемое устройство может представлять собой, например, небольшой ящик, который легко водрузить в любой области пространства. Если теория говорит, что шансы найти частицу в определенной точке равны 0,01 (потому что длина стрелки часов в этой точке составляет 0,1), то, устанавливая наш ящик вблизи этой точки, мы имеем 0,01 вероятности найти в ящике нужную частицу. Это значит, что на самом деле вряд ли в ящике что-то окажется. Однако если воссоздать эксперимент так, чтобы частица снова описывалась тем же самым набором циферблатов, повторять его можно сколько угодно раз. И теперь из каждых 100 наших заглядываний в ящик мы в среднем один раз будем обнаруживать в нем частицу – остальные 99 раз ящик будет пуст.

Интерпретация квадрата длины часовой стрелки как вероятности найти частицу в определенном месте на вид не так уж сложна, но действительно кажется, что мы (или, точнее говоря, Макс Борн) взяли ее с потолка. На самом деле в исторической перспективе оказалось, что даже таким величайшим ученым, как Эйнштейн и Шрёдингер, было трудно принять подобное толкование. Через 50 лет после лета 1926 года Поль Дирак вспоминал: «Проблема правильного истолкования оказалась гораздо сложнее, чем просто вывести уравнения». Несмотря на всю эту сложность, стоит отметить, что к концу 1926 года спектр света, испускаемого атомом водорода, который стал одной из величайших загадок физики XIX века, уже вычислили с помощью уравнений как Гейзенберга, так и Шрёдингера (Дирак со временем доказал, что оба этих подхода во всех случаях совершенно эквивалентны).

Известны возражения Эйнштейна против вероятностной природы квантовой механики, которые он в декабре 1926 года высказал в письме к Борну: «Теория говорит очень много, но на деле не приближает нас

к тайне Старика. В любом случае я убежден, что *Он* не играет в кости». Проблема в том, что до этого времени считалось, будто физика имеет полностью детерминистский характер. Конечно, идея вероятности характерна не только для квантовой теории. Она регулярно применяется во множестве ситуаций – от ставок на бегах до термодинамики, которой занимались лучшие умы еще в Викторианскую эпоху. Но причиной использования этих вероятностей были не фундаментальные законы, а как раз недостаток знаний о соответствующей сфере.

Возьмем подбрасывание монетки – архетипическую игру случая. Все мы знакомы с вероятностью в этом контексте. Если мы подбросим монетку 100 раз, можно ожидать, что в среднем 50 раз выпадет орел и 50 раз решка. До квантовой теории мы обязаны были бы сказать, что, обладая всеми необходимыми данными о монете – о точном способе ее подбрасывания в воздух, силе притяжения, о воздушных потоках, проходящих через комнату, температуре воздуха и т. д., – мы могли бы *в принципе* предсказать, что выпадет – орел или решка. Появление вероятностей в этом контексте, таким образом, можно считать отражением недостатка знаний о системе, а не чем-то внутренне присущим самой этой системе.

Вероятности в квантовой теории имеют совершенно иную природу; они фундаментальны. Мы можем предсказать лишь вероятность появления частицы в определенном месте, и не потому, что мы невежественны. Мы *даже в принципе* не можем предсказать, каково будет положение частицы. Что мы можем предсказать, да еще и с абсолютной точностью, так это вероятность того, что частица окажется в определенном месте, если мы будем ее там искать. Более того, мы с абсолютной точностью можем предсказать, как эта вероятность изменится со временем. Борн прекрасно высказался об этом еще в 1926 году: «Частицы движутся по законам вероятности, но сама вероятность распространяется по закону причинности». Именно об этом идет речь и в уравнении Шрёдингера: оно позволяет точно вычислить, как будет выглядеть волновая функция в будущем, если знать ее вид в прошлом. В этом смысле оно аналогично законам Ньютона. Разница в том, что если законы Ньютона позволяют вычислить положение и скорость частиц в любое конкретное время в будущем, то квантовая механика позволяет вычислить лишь вероятность того, что они будут находиться в определенном месте.

Именно такое падение предсказательной силы и беспокоило Эйнштейна и многих его коллег. Сейчас, с высоты восьмидесяти прошедших лет и после огромного объема проделанной работы спорить

по этому поводу кажется несколько бессмысленным: легко заявить, что Борн, Гейзенберг, Паули, Дирак и еще кое-кто были правы, а Эйнштейн, Шрёдингер и другие представители старой гвардии ошибались. Но в то время казалось вполне разумным полагать, что квантовая теория просто еще не завершена и что вероятности возникают, как в термодинамике или при подбрасывании монеты, потому что мы упускаем какую-то информацию о частицах. Сегодня у этой идеи мало сторонников: теоретические и экспериментальные данные свидетельствуют, что природа действительно имеет дело со случайными числами и отсутствие возможности предсказывать положение частицы как несомненный факт – это внутреннее свойство физического мира: вероятности – это лучшее, на что мы можем рассчитывать.

4. Все, что может случиться, действительно случается

Итак, теперь можно заняться детальным исследованием квантовой теории. Техническое содержание основных идей довольно простое – сложно лишь примириться с тем, что они бросают вызов нашим предубеждениям по поводу устройства мира. Мы уже говорили, например, что частицу можно представить в виде множества маленьких циферблатов, расставленных здесь и там, и что длина стрелки такого циферблата (возведенная в квадрат) соответствует вероятности, с которой частицу можно обнаружить в конкретном месте. Циферблаты – это не суть системы, а математический инструмент, которым мы пользуемся, чтобы вычислить шансы найти где-то нашу частицу. Мы привели правило сложения циферблатов, необходимое для описания феномена интерференции. Сейчас нам нужно окончательно свести концы с концами и сформулировать правило, которое объясняло бы, как циферблаты изменяются от одного момента к другому. Это правило послужит заменой первому закону Ньютона в том смысле, что позволит спрогнозировать действия частицы, оставленной в покое. Сначала представим одиночную частицу в некоторой точке.

Мы знаем, как представлять частицу в точке (рис. 4.1). Итак, изображен одиночный циферблат с длиной стрелки 1 (потому что 1 в квадрате – это и есть 1, стало быть, вероятность найти частицу в этой точке равна 1, то есть 100 %). Предположим, что на циферблате 12 часов, хотя этот выбор совершенно произволен. С точки зрения вероятности стрелка часов может указывать в любом направлении, но надо же с чего-то начать, так что условимся на 12 часов. Мы хотим добиться ответа на следующий вопрос: каковы шансы того, что частица позже будет находиться где-то еще? Иными словами, сколько еще циферблатов нужно нарисовать и где их поместить в следующее мгновение? Исааку Ньютону на такой очевидный вопрос отвечать было бы даже скучно: если мы размещаем где-то частицу и ничего с ней не делаем, она никуда и не движется. Но природа весьма категорично утверждает, что это попросту неверно. На самом деле Ньютон не мог ошибиться еще сильнее.

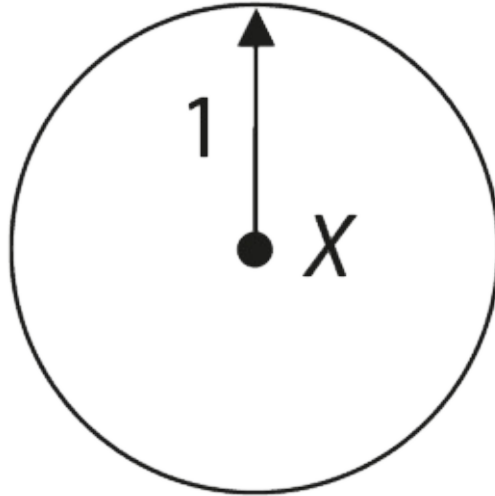


Рис. 4.1. Одиночный циферблат, представляющий частицу, которая четко локализуется в конкретной точке пространства

А вот и правильный ответ: частица *в следующий момент может оказаться в любой точке Вселенной*. Это значит, что нам придется нарисовать бесконечное множество циферблатов – по одному для каждой мыслимой точки в пространстве. Это предложение стоит перечитать много раз. Наверное, лучше раскрыть эту мысль.

Допущение, что частица может быть где угодно, эквивалентно полному отсутствию предположений по поводу ее движения. Это самое беспристрастное допущение, которое мы можем сделать, и такое решение обладает определенной аскетической [\[7\]](#) привлекательностью, хотя, по общему признанию, действительно кажется, что оно нарушает все законы здравого смысла, а заодно, возможно, и законы физики.

Циферблат представляет нечто определенное – вероятность того, что частица будет обнаружена на месте этого циферблата. Если мы знаем, что частица находится в конкретном месте в конкретное время, то представляем это в виде одиночного циферблата в этой точке. Но если мы начнем с частицы, находящейся в нулевой момент времени в определенном месте, то для «нулевого момента плюс еще сколько-то времени» придется нарисовать огромное – на самом деле бесконечное – количество других циферблатов, заполняющих всю Вселенную. Так подтверждается возможность того, что частица перепрыгивает *в любое другое место* в одно мгновение. Наша частица будет одновременно и в нанометре от исходного положения, и в миллиарде световых лет отсюда, в ядре звезды отдаленной галактики. Звучит, говоря по-простому, странно. Но нужно со всей ясностью сказать: теория должна быть способна

объяснить двухщелевой эксперимент, и как волна начинает распространяться, если обмакнуть в стоячую воду палец ноги, так и электрон, изначально расположенный в некой точке, должен распространяться с течением времени. Нужно только установить, как именно он распространяется.

Мы предполагаем, что, в отличие от водяной волны, электронная волна распространяется по всей Вселенной мгновенно. В техническом смысле можно сказать, что правило распространения частиц отличается от правила распространения водяной волны, хотя в обоих случаях распространение соответствует «волновому уравнению». Уравнение для водяных волн отличается от уравнения волн-частиц (это то самое знаменитое уравнение Шрёдингера, которое мы упомянули в прошлой главе), но оба они связаны с физикой волн. Различия – в деталях того, как объекты движутся с места на место. Кстати, если вы немного в курсе теории относительности Эйнштейна, то должны бы занервничать, услышав, что мы ведем речь о мгновенных перемещениях частицы по Вселенной, так как получается, словно что-то передвигается быстрее скорости света. На самом же деле идея того, что частица может быть здесь и через мгновение очень далеко отсюда, сама по себе вовсе не противоречит теориям Эйнштейна, потому что суть их в том, что быстрее скорости света не может перемещаться информация, а этому ограничению квантовая теория удовлетворяет. Как мы вскоре увидим, динамика прыжков частиц через Вселенную совершенно не такая, как при передаче информации, потому что мы не можем сказать заранее, куда же прыгнет частица. Кажется, что наша теория строится на полной анархии, и будет вполне естественно, если вы не поверите, что природа так себя может вести. Но далее в этой книге мы убедимся, что порядок нашей повседневной жизни действительно берет свое начало в этом фантастически абсурдном поведении.

Если вам непросто переварить подобную анархию – например, необходимость наполнить всю Вселенную маленькими циферблатами, чтобы описать движение единственной субатомной частицы от одного момента к другому, – то вы в хорошей компании. Снятие покровов с квантовой теории и попытки истолковать ее внутреннюю деятельность поставят в тупик кого угодно. Нильс Бор, например, известен такой фразой: «Те, кто не пришел в ужас при знакомстве с квантовой механикой, просто не могут ее понять». Ричард Фейнман предварил третий том «Фейнмановских лекций по физике» словами: «Думаю, могу с уверенностью сказать, что никто не понимает квантовую механику». К счастью, следовать ее законам гораздо проще, чем пытаться разобраться

в ее сути. Способность тщательно рассматривать последствия определенного набора предположений, не слишком затрудняя себя их философским смыслом, – одно из самых важных умений современного физика. Это как раз в духе Гейзенберга: зададим первичные предположения и вычислим их последствия. Если мы получаем набор предсказаний, согласующихся с повседневными наблюдениями, теория признается жизнеспособной.

Многие проблемы слишком сложны, чтобы решить их одним мыслительным усилием, а глубокое понимание редко приходит в моменты, когда ученый кричит «эврика». Нужно убедиться, что вы действительно понимаете каждый мельчайший шаг, и после достаточного количества шагов должно появиться понимание общей картины. В противном случае мы поймем, что пошли по ложному пути и нужно начинать все с начала. Эти мельчайшие шаги, которые мы упомянули, не так сложны, но идея взять один циферблат и превратить его в бесконечное множество циферблатов, безусловно, сложна, особенно если представить себе, что их все надо нарисовать. Вечность, если перефразировать Вуди Аллена, – это очень долго, особенно ближе к концу. Советуем не паниковать и не сдаваться. В любом случае мы имеем дело лишь с кусочком вечности. Наша следующая задача – установить правило, которое будет описывать поведение этих циферблатов в определенное время после запуска частицы.

Это правило – основной закон квантовой теории, хотя впоследствии нам понадобится и второй закон, когда мы перейдем к рассмотрению возможности наличия во Вселенной больше одной частицы. Но начнем по порядку и сначала сосредоточимся на единственной на всю Вселенную частице: никто не обвинит нас в том, что мы хватаемся за все сразу. Итак, она существует в один миг времени – предположим, мы точно знаем, в какой именно, – и представлена единственным циферблатом. Наша конкретная задача – найти правило, описывающее, как будут выглядеть в любой момент все новые циферблаты, рассеянные по Вселенной.

Сначала мы сформулируем это правило, не подводя под него никаких оснований. К тому, почему правило звучит именно так, а не иначе, вернемся через несколько абзацев, но сейчас должны просто принять его на веру. Итак, вот оно: во время t в будущем стрелка циферблата, находящегося на расстоянии x от исходного циферблата, продвинется против часовой стрелки на величину, пропорциональную x^2 ; величина продвижения также пропорциональна массе частицы m и обратно пропорциональна времени t . В записи с помощью символов это значит, что нам нужно повернуть стрелку против хода часов на величину,

пропорциональную mx^2 / t . А если объяснять это словами, то быстрее двигаются по циферблату более массивные частицы, более далекие от исходной точки, а с течением времени ход становится медленнее. Существует алгоритм – или, если угодно, рецепт, – который точно описывает, как определить поведение определенного набора циферблатов в какой-то момент будущего. В каждой точке Вселенной мы рисуем новый циферблат, стрелка которого сдвинута на заданную правилом величину. Это подкрепляет наше предположение о том, что частица может (и так оно и есть) перепрыгивать из начального положения в любую другую точку Вселенной, порождая в процессе движения новые циферблаты.

Для простоты мы представляли только один исходный циферблат, но, конечно, в какой-то момент времени уже может существовать несколько циферблатов, и это отражает постулат, что частица не находится в каком-то определенном месте. Как разобраться с целой кучей циферблатов? Ответ таков: нужно делать то, что мы делали для одного циферблата, и повторять процесс для всех имеющихся циферблатов. Эту идею иллюстрирует рис. 4.2. Первичный набор циферблатов представлен маленькими кружками, а стрелки показывают, как частица перепрыгивает с места каждого первичного циферблата в точку X , «оставляя» там новый циферблат. Конечно, при этом каждый первичный циферблат порождает в точке X новый циферблат, и мы должны сложить их все вместе, чтобы создать окончательный циферблат для точки X . Размер этого окончательного циферблата дает вероятность впоследствии найти частицу в точке X .

.

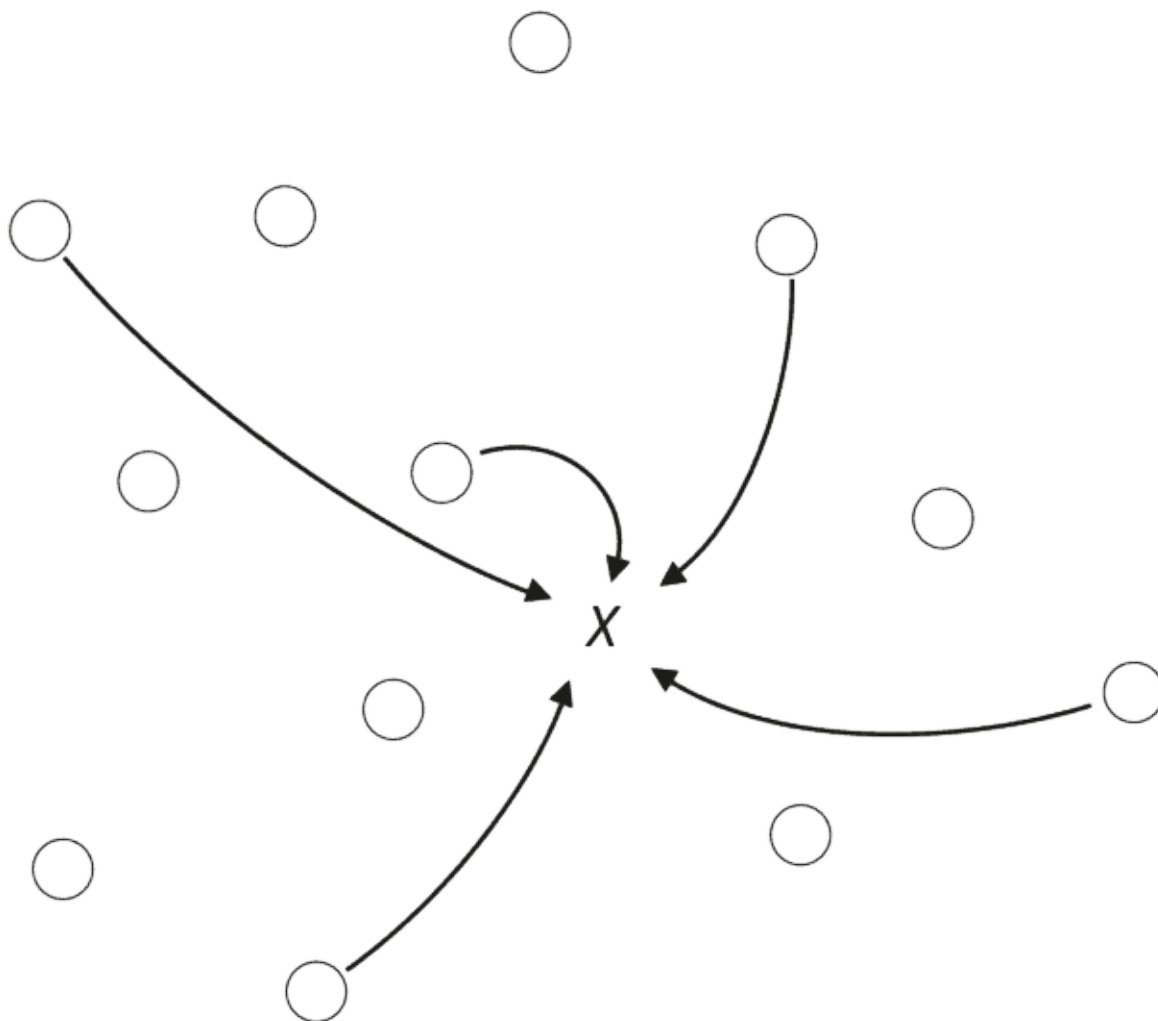


Рис. 4.2. Прыгающие циферблаты. Окружности соответствуют местонахождению частицы в определенный момент времени; нам необходимо каждой такой точке поставить в соответствие по циферблату. Чтобы вычислить вероятность обнаружения частицы в точке X , мы должны позволить частице прыгнуть туда из всех исходных мест ее пребывания. Несколько таких прыжков обозначено стрелками. Форма линий не имеет никакого значения и уж точно не означает, что частица движется с места нахождения циферблата в точку X по какой-то определенной траектории

Необходимость сложения всех появляющихся в точке циферблатов не так уж странна. Каждый циферблат соответствует специфической траектории, по которой частица могла бы прибыть в точку X . Сложение циферблатов легко понять, если вернуться к двухщелевому эксперименту: мы просто пытаемся перефразировать описание волны для циферблатов. Можем представить два исходных циферблата – по одному у каждой щели.

Каждый из них порождает новый циферблат на конкретной точке экрана в одно из последующих мгновений, и мы должны сложить эти два циферблата, чтобы получилась интерференционная фигура^[8]. Итак, правило предсказания внешнего вида циферблата в любой точке состоит в том, чтобы перенести в эту точку все исходные циферблаты, один за другим, а потом сложить их все по правилу сложения, описанному в предыдущей главе.

Так как мы решили описывать подобным языком распространение волн, можно использовать его и при размышлениях о более знакомых нам волнах. Самой идее уже много лет. Известно, что голландский физик Христиан Гюйгенс описывал так световые волны еще в 1690 году. Он, конечно, не упоминал воображаемых циферблатов, скорее подчеркивал, что каждую точку световой волны нужно рассматривать в качестве источника вторичных волн (как каждый циферблат порождает множество новых). Эти вторичные волны затем соединяются, что дает новую волну. Процесс повторяется, так что каждая точка новой волны служит источником результирующих волн, которые вновь соединяются друг с другом, и таким способом волна продвигается дальше.

Теперь можно вернуться к тому моменту, который может вызывать ваше справедливое беспокойство. Почему мы выбрали величину mx^2 / t для определения сдвига часовой стрелки? У этой величины есть имя – это *действие* – и долгая почтенная история в развитии физики. На самом деле никто пока не понимает, почему эта величина настолько прочно укоренилась в природе, а стало быть, никто не может рационально объяснить, почему стрелки движутся так, как движутся. Возникает вопрос: как вообще кто-то понял, что это так важно? Понятие действия впервые предложил немецкий философ и математик Готфрид Лейбниц в написанной в 1669 году, но неопубликованной работе, однако он не сумел найти способ производить вычисления с его помощью. Вновь ввел его в 1744 году французский ученый Пьер Луи де Мопертюи, а затем его использовал для формулировки нового и очень мощного принципа природы друг Мопертюи, математик Леонард Эйлер. Представьте себе мяч, летящий по воздуху. Эйлер обнаружил: мяч движется по такой траектории, что действие между двумя точками маршрута будет каждый раз наименьшим. В случае с мячом действие соотносимо с разностью между кинетической и потенциальной энергией мяча^[9]. Эта закономерность получила название «принципа наименьшего действия», и он может быть использован как альтернатива ньютоновым законам движения. На первый

взгляд, принцип довольно странен, потому что кажется, будто для полета с наименьшим действием шар должен заранее знать, куда он собирается лететь еще до того, как он туда полетит. Как иначе он мог бы лететь по воздуху так, чтобы величина, именуемая действием, каждый раз получалась минимальной, когда он уже пролетел? Если перефразировать, то принцип наименьшего действия кажется телеологическим (так говорят, когда предполагают, что события происходят с целью достичь заранее предопределенного исхода). Телеологические идеи вообще пользуются в науке дурной репутацией, и несложно догадаться почему. В биологии телеологическое объяснение появления сложных существ подкрепляло бы теорию существования творца, в то время как теория эволюции путем естественного отбора, выдвинутая Дарвином, предлагает гораздо более простое объяснение, которое к тому же прекрасно согласуется с имеющимися данными. В теории Дарвина нет телеологического компонента: случайные мутации ведут к появлению вариаций в организмах, а внешнее давление со стороны среды и других живых существ определяет, какие вариации передаются следующим поколениям. Этот процесс – единственный, способный объяснить то многообразие и сложность жизненных форм, которые мы наблюдаем сейчас на Земле. Иными словами, устраняется необходимость божественного промысла и постепенного восхождения организмов к какому-то совершенству. Вместо этого оказывается, что эволюция жизни – случайный путь, который определяется несовершенным копированием генов в постоянно меняющихся условиях внешней среды. Лауреат Нобелевской премии французский биолог Жак Моно даже назвал краеугольным камнем современной биологии «систематическое или аксиоматическое отрицание возможности того, что научное знание может быть получено на основе теорий, которые явным или неявным образом включают в себя телеологический принцип».

У физиков, однако, споры о том, работает ли принцип наименьшего действия, не ведутся, потому что он позволяет производить вычисления, верно описывающие природу, и является краеугольным камнем физики. Можно возразить, что принцип наименьшего действия вовсе не телеологический, но все споры в любом случае закончатся, когда мы возьмем на вооружение подход Фейнмана к квантовой механике. Мяч, летящий по воздуху, «знает», какую траекторию избрать, потому что на самом деле втайне исследует каждую возможную траекторию.

Как же выяснилось, что правило хода стрелок часов имеет нечто общее с величиной, именуемой действием? В исторической перспективе

первым такую формулировку квантовой теории, включающей понятие действия, предложил Дирак, но со свойственной ему эксцентричностью опубликовал свое исследование в советском журнале – в знак поддержки советской науки. Статья под названием «Лагранжиан в квантовой механике» была опубликована в 1933 году и пребывала в забвении много лет. Весной 1941 года молодой Ричард Фейнман размышлял, как разработать новый подход к квантовой теории, используя лагранжеву формулировку классической механики (эта формулировка вытекает из принципа наименьшего действия). Однажды вечером на пивной вечеринке в Принстоне он встретил Герберта Йеле, европейского физика, и, как это водится у физиков, после нескольких кружек они начали обсуждать идеи для исследований. Йеле вспомнил давнюю статью Дирака, и на следующий день они нашли ее в Принстонской библиотеке. Фейнман немедленно начал вычисления по методам Дирака, и в течение дня на глазах у Йеле обнаружил, что может вывести уравнение Шрёдингера из принципа наименьшего действия. Это был большой шаг вперед, хотя Фейнман изначально предполагал, что Дирак мог уже сделать то же самое, потому что это ведь было элементарно; да, элементарно, если вас зовут Ричардом Фейнманом. Со временем Фейнману удалось выяснить у Дирака, знал ли тот, как можно использовать его работу 1933 года, если сделать несколько дополнительных математических шагов. Позднее Фейнман вспоминал, что Дирак, лежа на принстонской траве после не самой выдающейся лекции, ответил просто: «Нет, я не знал. Это интересно». Дирак был одним из величайших физиков в истории, но говорил очень мало. Юджин Вигнер, сам принадлежавший к сонму великих, заметил: «Фейнман – это второй Дирак, но на этот раз с человеческим лицом».

Итак, напомним: мы сформулировали правило, которое позволяет зарисовать множество циферблатов, представляющих состояние частицы в некий момент времени. Правило довольно странное: мы наполняем Вселенную бесконечным количеством циферблатов, которые все оказываются связанными друг с другом отношениями, зависящими от тоже довольно странной, но имеющей большое историческое значение величины – действия. Если два или более циферблата оказываются в одном положении в одно и то же время, они суммируются. Правило основано на том, что мы должны предоставить частице свободу перепрыгнуть из любого конкретного места во Вселенной в любое другое место за бесконечно малое время. Мы сразу же сказали: такие абсурдные на вид идеи должны подвергнуться проверке путем столкновения с природой, чтобы убедиться, что получается что-то разумное. Для начала рассмотрим,

как из этой кажущейся анархии возникает нечто очень конкретное. Это один из краеугольных камней квантовой теории – принцип неопределенности Гейзенберга.

Принцип неопределенности Гейзенберга

Принцип неопределенности Гейзенберга – одна из самых неправильно понимаемых частей квантовой теории, тропинка, по которой всякие шарлатаны и поставщики вздора проталкивают свою философскую ерунду. Гейзенберг представил эту концепцию в 1927 году в работе под названием *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*^[10], которое с трудом поддается переводу. Самое трудное слово – *anschaulich*, которое значит то ли «физический», то ли «интуитивный».

Гейзенбергом, возможно, двигало внутреннее раздражение по поводу того, что интуитивно более понятная версия квантовой теории, предложенная Шрёдингером, была принята шире, чем его собственная, несмотря на то что оба метода вели к одинаковым результатам. Весной 1926 года Шрёдингер был уверен, что его уравнение для волновой функции дает физическую картину происходящего внутри атомов. Он считал, что волновую функцию можно визуализировать и что она связана с распространением электрического заряда внутри атома. Это все оказалось неверным, но, по крайней мере, позволило физикам уверенно чувствовать себя всю первую половину 1926 года, пока Борн не предложил вероятностную интерпретацию.

Гейзенберг, с другой стороны, построил свою теорию на абстрактной математике, которая чрезвычайно успешно предсказывала результаты экспериментов, но не подлежала четкой физической интерпретации. Он изложил свое раздражение Паули в письме от 8 июня 1926 года – за несколько недель до того, как Борн метнул свой метафорический гаечный ключ в сторону интуитивного подхода Шрёдингера: «Чем больше я думаю о физической стороне теории Шрёдингера, тем более отвратительной она мне кажется. Там, где Шрёдингер пишет об *Anschaulichkeit* (наглядности) своей теории... я читаю *Mist*». Немецкое слово *mist* переводится как «вздор», «дерьмо»... или «ерунда».

Гейзенберг решил выяснить, что же должно пониматься под «интуитивной картиной», или *Anschaulichkeit*, физической теории. Что, спросил он себя, квантовая теория должна говорить о таких уже известных свойствах частиц, как их положение? В духе своей оригинальной гипотезы он предположил, что имеет смысл вести речь о положении частицы, только если указать при этом, как его измерять. Поэтому нельзя задавать вопрос,

действительно ли электрон находится внутри атома водорода, не описав, каким, собственно, образом вы собираетесь получить информацию об этом. Кажется, это похоже на семантику, но нет. Гейзенберг заметил, что сам процесс измерения порой вносит возмущение, результатом которого становятся ограничения на пути того, что мы можем «знать» об электроне. В своей оригинальной работе Гейзенберг сумел оценить отношения между точностью измерения положения и импульса частицы. В знаменитом принципе неопределенности он утверждает, что если Δx – это неопределенность наших знаний о положении частицы (греческая буква Δ произносится «дельта», так что Δx произносится «дельта икс»), а Δp – соответствующая неопределенность импульса, то

$$\Delta x \Delta p \sim h,$$

где h – постоянная Планка, а символ \sim значит «примерно равен». Иными словами, произведение неопределенности положения частицы на неопределенность ее импульса будет приблизительно равно постоянной Планка. Это значит, что чем более точно мы определяем положение частицы, тем меньше можем знать о ее импульсе, и наоборот. Гейзенберг пришел к этому выводу, рассматривая отрыв фотонов от электронов. Фотоны – это средство, благодаря которому мы «видим» электрон, как и все остальные объекты: фотоны отрываются от них и собираются перед нашими глазами. Обычно свет, испускаемый объектом, вызывает в самом объекте лишь незначительные возмущения, но это не отменяет нашей фундаментальной неспособности полностью отделить процесс измерения от измеряемого предмета. Логично предположить, что можно миновать ограничения принципа неопределенности, если придумать достаточно хитроумный эксперимент. Сейчас мы покажем, что это не так, и принцип неопределенности носит фундаментальный характер: мы выведем его исключительно из нашей теории циферблатов.

Вывод принципа неопределенности Гейзенберга из теории циферблатов

Вместо того чтобы начать с частицы в определенной точке, подумаем лучше о ситуации, когда мы лишь примерно знаем, где находится частица, но точное ее местоположение неизвестно. Если она где-то в небольшой области пространства, нужно представить ее в виде ряда циферблатов, занимающих всю эту область. В каждой его точке будет находиться по циферблату, и эти циферблаты отразят вероятность, с которой частицу можно найти в этой точке. Если мы возведем в квадрат длины всех стрелок этих циферблатов в каждой точке и сложим, то получим 1, то есть вероятность найти частицу *где-то* в этой области равна 100 %.

Через некоторое время мы воспользуемся собственными квантовыми правилами для серьезных вычислений, но сначала вынуждены признаться, что забыли упомянуть важное дополнение к правилу поворота стрелок. Мы не хотели вводить его раньше, потому что это чисто техническая деталь, но, если игнорировать ее при вычислении реальных вероятностей, правильных ответов не получим. Относится эта деталь к тому, что написано в конце предыдущего абзаца.

Если начать с одиночного циферблата, стрелка должна иметь длину 1, потому что частица должна находиться в месте расположения циферблата со 100 %-ной вероятностью. Наше квантовое правило гласит: чтобы описать положение частицы в какой-то момент будущего, мы должны переместить циферблат во все точки Вселенной, соответственно тому, как частица может прыгнуть из своего текущего местоположения. Естественно, мы не в силах сделать так, чтобы все стрелки циферблатов имели длину 1, потому что тогда вся интерпретация вероятности рушится. Представьте, например, что частица описывается четырьмя циферблатами, так как находится в четырех разных местах. Если стрелка каждого циферблата имеет длину 1, то вероятность того, что частица находится в любой из четырех позиций, будет равняться 400 % – очевидно, что это нонсенс. Чтобы решить эту проблему, мы должны уменьшать циферблаты, а не только двигать их против часовой стрелки. Это «правило уменьшения» гласит, что после того, как все новые циферблаты будут порождены, каждый из них должен быть разделен на квадратный корень из общего количества часов^[11]. Для четырех часов это значит, что каждую стрелку нужно разделить на $\sqrt{4}$, то есть стрелка каждого циферблата будет иметь

длину $\frac{1}{2}$. Отсюда следует: вероятность того, что частица будет найдена на месте любого из четырех циферблатов, равна $(\frac{1}{2})^2 = 25\%$. Таким простым способом мы можем убедиться, что вероятность нахождения частицы где-либо всегда будет 100 %-ной.

Конечно, количество возможных положений может быть бесконечным, так что циферблаты могут оказаться и нулевого размера. Это вызывает тревогу, но математика справится. Для наших целей мы всегда будем считать, что число циферблатов конечно и нам никогда не будет нужно знать, насколько уменьшается каждый циферблат.

Вернемся к предположению, что Вселенная содержит единственную частицу, положение которой точно не известно. Следующий раздел можете воспринимать как небольшую математическую задачу – следить за ходом мысли сначала окажется сложно (тогда попробуйте пересчитать), но если вы сможете понять, что происходит, то поймете и то, как возникает принцип неопределенности. Для простоты допустим, что частица движется в одномерном пространстве, то есть находится где-то на прямой линии. Более реалистичный пример для трех измерений не отличается фундаментально, зато его сложнее изобразить. На рис. 4.3 мы сделали зарисовку ситуации одномерного движения, изобразив частицу линией из трех циферблатов. Однако нужно представить, что их намного больше – по одному в каждой точке, где может находиться частица. Просто нарисовать такое количество было бы очень трудно. В этой группе циферблатов, соответствующей исходному положению частицы, циферблат 3 находится слева, а циферблат 1 – справа. Итак, в этой ситуации мы знаем, что частица в начальный момент находится где-то между циферблатами 1 и 3. Ньютон сказал бы, что она останется между циферблатами 1 и 3, если с ней ничего не делать, но как насчет квантового правила? Здесь-то и начинается самое интересное: мы поиграем с правилами циферблатов, чтобы ответить на этот вопрос.

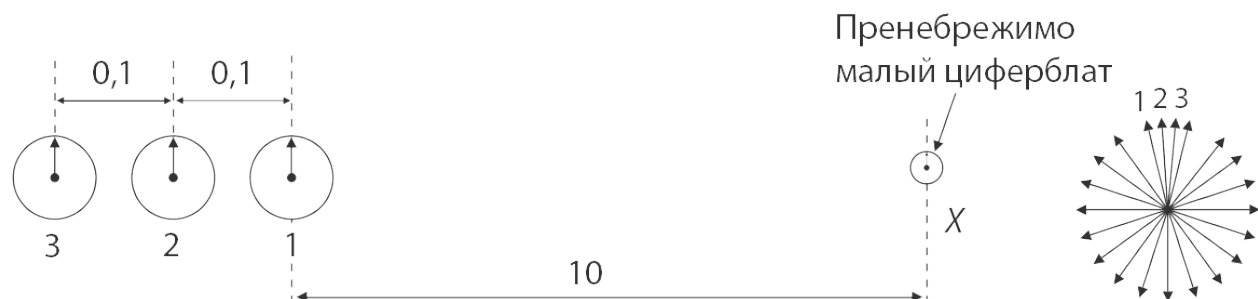


Рис. 4.3. Три циферблата, показывающие одинаковое время и расположенные на одной линии, описывают частицу, в начальный момент

находящуюся где-то в области этих циферблатов. Нас интересует, каковы шансы на то, чтобы найти частицу в точке X в некоторый последующий момент времени

Позволим времени идти вперед и выясним, что произойдет с этим рядом циферблатов. Представим себе сначала одну конкретную точку на большом расстоянии от исходной группы циферблатов. На рисунке она отмечена буквой X . О точных параметрах «большого расстояния» поговорим чуть позже, а сейчас это просто значит, что стрелки должны существенно изменить свое положение.

Применив правила игры, мы должны перенести каждый циферблат из исходной группы в точку X , передвигая стрелки и уменьшая их соответствующим образом. Физически это соответствует тому, что частица прыгает из точки поля в точку X . В точку X прибудет несколько циферблатов – по одному из каждой исходной точки, и следует сложить их все. В итоге квадрат длины результирующей стрелки циферблата в точке X даст нам вероятность нахождения частицы в X .

Теперь понаблюдаем за процессом в развитии и добавим ряд цифр. Допустим, что точка X находится на расстоянии 10 единиц от циферблата 1, а ширина области, занимаемой исходной группой циферблатов, – 0,2 единицы. При ответе на очевидный вопрос «Что это за расстояние – 10 единиц?» в наше повествование входит постоянная Планка, но сейчас мы ловко отпихиваем ее в сторону и просто отмечаем, что 1 единица расстояния соответствует 1 полному (12-часовому) обороту стрелки на циферблате. Это значит, что точка X примерно в $10^2 = 100$ полных оборотах от изначального поля (помните о правиле хода часов). Положим также, что циферблаты в исходной группе были одного размера и все указывали на 12 часов. Предположение об их одинаковом размере – это предположение о том, что частицу можно с одинаковыми шансами найти в точках, соответствующих циферблатам 1, 2 и 3 на нашем рисунке, а значение того, что все циферблаты показывают одинаковое время, выявится позднее.

Чтобы переместить циферблат из точки 1 в точку X , нужно в соответствии с правилом сделать полный оборот стрелки против хода часов 100 раз. Сейчас перенесемся в точку 3, которая находится в 0,2 единицы от точки 1, и переместим в X и этот циферблат. Так как этот циферблат должен пройти 10,2 единицы, открутить его стрелку назад нужно чуть дальше – $10,2^2$ раза, что очень близко к 104.

Теперь у нас два циферблата в точке X , соответствующие частице,

прибывшей туда из точки 1, и частице, прибывшей из точки 3. Их нужно сложить, чтобы начать вычислять итоговый циферблат. Поскольку обе стрелки были откручены назад примерно одинаковое количество раз, то они оба показывают приблизительно 12 часов. При сложении они дают часы с более длинной стрелкой, тоже указывающей на 12. Заметьте, роль играет только конечное положение часовой стрелки. Нет смысла фиксировать число ее оборотов. Пока все хорошо, но мы еще не закончили, потому что между правым и левым краями исходной группы еще есть множество маленьких циферблатов.

И мы переводим внимание на циферблат, лежащий посередине исходной группы, то есть в точке 2. Этот циферблат находится в 10,1 единицы от X , то есть нужно совершить 10,12 оборота стрелки. Это очень близко к 102 полным оборотам, то есть снова получается целое число. Нужно прибавить этот циферблат к остальным из точки X , и, как и в предыдущий раз, стрелка станет длиннее. Продолжим: есть точка между точками 1 и 2, и при перемещении циферблата в точку X нужно будет сделать 101 полный оборот, что снова удлинит стрелку получающегося циферблата. И тут наступает важный момент. Если обратиться к циферблату между этими двумя, то его нужно будет подкрутить 100,5 раза до достижения точки X . Таким образом получится циферблат, стрелка которого укажет на 6 часов, и при сложении мы уменьшим длину стрелки в X . Немного подумав, вы убедитесь, что, хотя точки, отмеченные как 1, 2 и 3, дают в X циферблаты, указывающие на 12, как и точки, лежащие между 1–2 и 2–3, но точки, лежащие на $\frac{1}{4}$ и $\frac{3}{4}$ пути между 1–3 и 2–3, дают циферблаты, указывающие на 6. Всего получается 5 циферблатов со стрелкой вверх и 4 циферблата со стрелкой вниз. При сложении всех этих циферблатов мы получим в точке X такой циферблат, стрелка которого будет микроскопической, потому что почти все циферблаты будут отменять друг друга.

Такое «аннулирование циферблатов», разумеется, относится и к более реалистическому случаю, когда мы принимаем во внимание абсолютно все точки, лежащие в области между точками 1 и 3. К примеру, точка, лежащая на $\frac{1}{8}$ пути от точки 1, дает циферблат со стрелкой на 9 часов, в то время как точка, лежащая на $\frac{3}{8}$ пути, указывает на 3 часа – и снова они отменяют друг друга. В суммарном итоге оказывается, что циферблаты, соответствующие всем возможным для частицы маршрутам из любой точки поля в точку X , отменяют друг друга. Аннулирование показано в правом углу рисунка. Стрелки соответствуют часовым стрелкам, прибывающим в X из различных точек исходной области.

В результате сложения всех этих стрелок они отменяют друг друга. Это основной момент, который нужно усвоить.

Итак, повторим: мы сейчас показали, что, если исходная группа циферблатов достаточно велика и точка X достаточно далека, то для каждого циферблата, прибывающего в X со стрелкой на 12 часов, найдется другой циферблат со стрелкой на 6 часов, отменяющий предыдущий. Для каждого циферблата со стрелкой на 3 часа найдется другой со стрелкой на 9 часов, отменяющий первый, и т. д. Эта массовая отмена подразумевает, что на самом деле нет практически никаких шансов найти частицу в точке X . Звучит это очень интересно и вдохновляюще, так как кажется, что описание соответствует неподвижной частице. Начав со смехотворного на вид предположения о том, что частица может перемещаться из любой точки пространства в любое другое место Вселенной за очень короткий срок, мы обнаруживаем, однако, что это не так, если начать с группы циферблатов. В ситуации, когда все циферблаты интерферируют друг с другом, частица практически не имеет возможности сдвинуться далеко от исходного положения.

Этот вывод, по словам профессора Оксфордского университета Джеймса Блайни, стал результатом «неконтролируемой квантовой интерференции». Для этого явления и соответствующей ему взаимной отмены циферблатов точка X должна быть достаточно далека от исходной области, – настолько, чтобы циферблаты могли совершить достаточное количество оборотов. Почему? Потому что если точка X расположена слишком близко, то стрелки часов, возможно, не успеют сделать даже один оборот, а следовательно, *не будут* отменять друг друга столь эффективно. Представим, например, что расстояние между циферблатом в точке 1 и точкой X не 10 единиц, а 0,3 единицы. Теперь стрелка циферблата на передней стороне области повернется меньше, чем в предыдущем случае, совершая всего $0,3^2 = 0,09$ оборота, и укажет на начало второго. Аналогично стрелка циферблата из точки 3 на задней стороне области совершит $0,5^2 = 0,25$ оборота и укажет на 3 часа. Соответственно, все циферблаты в X укажут на что-то между часом и тремя, то есть больше не отменяют друг друга, а складываются в один большой циферблат, указывающий приблизительно на 2 часа. Все это говорит о том, что существует довольно весомый шанс нахождения частицы в местах, расположенных вблизи от исходной области, но все же вне ее. Под «вблизи» мы понимаем расстояние, недостаточное для того, чтобы получить по меньшей мере один оборот стрелки часов. Все это уже намекает на принцип неопределенности, но по-прежнему выглядит

довольно туманно, поэтому давайте разберемся, что именно мы понимаем под «достаточно большой» исходной областью и «достаточно удаленной» от него точкой.

Вслед за Дираком и Фейнманом мы сделали предположение, что, если частица массой m проходит расстояние x за время t , величина поворота стрелок будет пропорциональна действию, то есть mx^2 / t . Однако слова «пропорциональна» недостаточно, если нужно рассчитать реальные величины. Нужно точно знать, чему равен поворот стрелок. В главе 2 мы говорили о законе всемирного тяготения Ньютона и для точных количественных прогнозов ввели понятие гравитационной постоянной Ньютона, которая определяет величину силы гравитации.

С помощью добавления в уравнение постоянной Ньютона можно подставлять числа в уравнение и вычислять характеристики реальных физических явлений, например период обращения Луны по орбите или маршрут движения космического корабля «Вояджер-2» по Солнечной системе. Но нам нужно что-то подобное и для квантовой механики – такая природная константа, которая «задает масштаб» и позволяет нам взять величину действия и выдать точное предсказание того, сколько оборотов должны сделать часовые стрелки при перемещении частицы на конкретное расстояние из исходного положения за заданное время. Эта константа называется постоянной Планка.

Краткая история постоянной Планка

Вечером 7 октября 1900 года в полете вдохновения Макс Планку удалось понять, каким образом нагретые тела излучают энергию. Всю вторую половину XIX века точные отношения между распространением световых волн, испускаемых нагретыми телами, и их температурой были одной из главных загадок физики. Каждое нагретое тело испускает свет, причем с увеличением температуры природа этого света изменяется. Мы знакомы с видимым диапазоном света, соответствующим цветам радуги, но свет может иметь и такую длину волны, которая окажется слишком короткой или слишком длинной по сравнению с видимым человеческим глазом спектром. Свет с большей длиной волны называется «инфракрасным», его можно наблюдать с помощью приборов ночного видения. Еще более длинные – радиоволны. Более короткие, чем видимый спектр, световые волны называются ультрафиолетовыми, а волны самой короткой длины относятся к гамма-излучению. Неосвещенный кусок угля при комнатной температуре испускает инфракрасное излучение. Но если бросить его в костер, он начнет светиться красным цветом. Дело в том, что при повышении температуры угля средняя длина волны излучения уменьшается, постепенно доходя до значения, воспринимаемого человеческим глазом. Чем сильнее нагрето тело, тем короче длина волны, которую оно излучает. В XIX веке, когда точность экспериментальных измерений существенно выросла, стало ясно, что верной математической формулы для описания этого наблюдения не существует. Эту ситуацию часто называют «проблемой излучения черного тела», потому что физики называют идеализированные объекты, которые полностью поглощают излучение и затем переизлучают его (осуществляют реэмиссию), «черными телами». Эта проблема была очень серьезной, потому что показывала неспособность физиков понять характер света, излучаемого всеми на свете объектами.

Планк обдумывал этот и сопредельные вопросы термодинамики и электромагнетизма много лет, прежде чем был назначен профессором теоретической физики в Берлине. Изначально пост предлагался Больцману и Герцу, но оба отклонили предложение. Это оказалось неожиданной удачей, потому что Берлин был центром экспериментальных исследований излучения черного тела, а погружение Планка в сердце экспериментальной работы оказалось ключевым для его последующих теоретических

свершений. Физики часто работают лучше, когда имеют возможность вести незапланированные беседы с коллегами по самому широкому спектру вопросов.

Мы знаем дату и время откровения, явившегося Планку, потому что он с семьей проводил воскресный день 7 октября 1900 года вместе с коллегой Генрихом Рубенсом. За обедом они обсуждали непригодность современных им теоретических моделей для детального объяснения излучения черного тела. К вечеру Планк нацарапал формулу на почтовой открытке и отправил Рубенсу. Формула оказалась верной, но выглядела и впрямь очень странно. Планк позднее охарактеризовал свои действия как жест отчаяния: он перепробовал все, что пришло в голову. Честно говоря, совершенно непонятно, как он пришел к своей формуле. В великолепной биографии «Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна», составленной Абрахамом Пайсом, написано: «Его аргументация была безумной, но безумие это было того божественного сорта, который приносят в науку только величайшие ее представители». Предложение Планка было одновременно революционным и необъяснимым. Он понял, что может истолковать излучение черного тела, только если предположить, что энергия испускаемого излучения состоит из большого количества более мелких «пакетов» энергии. Иными словами, общая энергия квантуется в единицах новой фундаментальной константы природы, которую Планк назвал *квантом действия*. Сегодня мы называем ее постоянной Планка.

Формула Планка предполагает (хотя он не имел об этом представления), что свет *всегда* излучается и поглощается пакетами, или квантами. В современной записи эти пакеты обладают энергией $E = hc / \lambda$, где λ – длина световой волны (произносится «лямбда»), c – скорость света, а h – постоянная Планка.

Роль постоянной Планка в этом уравнении – быть коэффициентом преобразования длины световой волны в энергию соответствующего кванта. Предположение, что определенное Планком квантование энергии испускаемого света возникает, потому что сам свет тоже состоит из частиц, было очень осторожно выдвинуто Альбертом Эйнштейном. Он сделал это предположение в 1905 году, в чудесный год вспышки своего творческого гения, когда он сформулировал также специальную теорию относительности и самое знаменитое уравнение в истории науки: $E = mc^2$. Правда, Нобелевскую премию 1921 года по физике (которая из-за каких-то хитрых бюрократических уловок была вручена только в 1922-м) Эйнштейн получил за работу над фотоэффектом, а не за более известные теории относительности. Ученый предположил, что свет можно рассматривать

как поток частиц (в то время он не использовал термин «фотоны»), и верно осознал, что энергия каждого фотона обратно пропорциональна длине волны. Эта идея Эйнштейна стала источником одного из самых знаменитых парадоксов квантовой теории, в которой частицы ведут себя как волны, и наоборот.

Планк разрушил первые камни в основании Максвеллова представления о свете, показав, что энергия света, излучаемого нагретым телом, может быть описана, только если она испускается квантами. Окончательно разметал весь фундамент классической физики Эйнштейн. Его интерпретация фотоэлектрического эффекта заключалась не только в том, что свет испускается малыми порциями, но и в том, что он взаимодействует с материей в форме локализованных пакетов. Иными словами, свет действительно ведет себя как поток частиц.

Идея о том, что свет состоит из частиц (можно сказать, что «электромагнитное поле квантовано») звучала глубоко противоречиво, и правота Эйнштейна была признана лишь через несколько десятилетий. Так же неохотно, как они соглашались с идеей фотона, одним из соавторов которой стал сам Планк, в 1913 году коллеги Эйнштейна представляли его к членству в престижной Прусской академии (это было спустя целых восемь лет после введения понятия фотона):

«В целом можно сказать, что, кажется, нет ни одной крупной проблемы, на которые так богата современная физика, где Эйнштейн не отметил бы значительным вкладом. То, что порой его рассуждения могут оказываться несколько бесцельными, как, например, гипотеза световых квантов, нельзя рассматривать в качестве аргумента против него, потому что невозможно предлагать действительно новые идеи даже в самых точных науках, полностью исключая любой риск».

Иными словами, на самом деле в реальность фотонов никто не верил. Широко распространено было мнение о том, что предположение Планка относилось больше к свойствам материи – мельчайшим осцилляторам, испускающим свет, – чем к собственно свету. Было попросту слишком странно считать, что замечательные волновые уравнения Максвелла подлежат замене теорией частиц.

Мы рассказываем эту историю во многом для того, чтобы подтвердить: осознать квантовую теорию сложно всем и всегда. Визуализировать такие объекты, как электрон или фотон, нереально: они ведут себя то как частица,

то как волна, а иногда как ни то ни другое. Эйнштейна этот вопрос беспокоил до конца жизни. В 1951 году, за четыре года до смерти, он писал: «Все 50 лет труда не приблизили меня к ответу на вопрос: что же такое световые кванты?»

Сейчас, спустя еще 60 лет, не возникает сомнения, что теория, которую мы продолжаем разрабатывать с помощью множества мельчайших циферблатов, безошибочно описывает результаты каждого эксперимента, поставленного для ее проверки.

Обратно, к принципу неопределенности Гейзенберга

Такова вкратце история введения постоянной Планка. Но для наших целей важнее всего отметить, что постоянная Планка – это единица «действия», то есть та же величина, которая говорит нам, насколько нужно повернуть часы. Современное значение постоянной Планка равно $6,626 \times 10^{-34}$ кг·м²/с, что является крошечной величиной по меркам повседневности. Это и служит причиной того, почему мы не замечаем в повседневной жизни ее всепроникающего действия.

Вспомните, что мы писали о действии, соответствующем прыжку частицы из одной точки в другую: оно равно массе частицы, умноженной на квадрат расстояния, на которое совершен прыжок, и деленной на временной интервал, в течение которого этот прыжок происходит. Измеряется оно в кг·м²/с, как и постоянная Планка, так что если мы просто разделим действие на постоянную Планка, то все единицы сократятся и получится чистое число. Согласно Фейнману, это чистое число и есть та самая величина, на которую мы должны перевести стрелку, соответствующую частице, которая прыгает с одного места на другое. Например, если число равно 1, это значит один полный оборот, а если $\frac{1}{2}$, то пол-оборота, и т. д. В символической форме точная величина, на которую мы должны перевести стрелку часов для расчета вероятности прыжка частицы на расстояние x за время t , равна $mx^2 / (2\hbar t)$.

Заметьте: в формуле появляется дробь $\frac{1}{2}$. Вы можете либо принять на веру, что она необходима для достижения соответствия экспериментальным данным, либо заметить, что она возникает из самого определения действия^[12]. Оба варианта прекрасно подойдут. Сейчас, когда мы знаем значение постоянной Планка, можно точно вычислить величину поворота стрелки часов и коснуться вопроса, который чуть раньше оставили без ответа. А именно: что такое прыжок на расстояние «10»?

Посмотрим, что наша теория говорит о маленьком по повседневным нормам объекте – о песчинке. Теория квантовой механики, которую мы разработали, предполагает, что, если поместить песчинку в какую-то точку, позднее она *может* оказаться в любом другом месте Вселенной. Но очевидно, что с настоящими песчинками так не происходит. Мы уже видели способ выхода из этой потенциальной проблемы, потому что если интерференция между циферблатами, соответствующими песчинке,

перепрыгивающей из множества изначальных точек, достаточно, то при сложении циферблатов они все отменяют друг друга, и песчинка остается на месте.

Первый вопрос, на который нужно ответить, звучит так: сколько раз будут повернуты стрелки часов, если мы переместим частицу с массой песчинки на расстояние, например, 0,001 мм за одну секунду? Мы не сможем увидеть такое небольшое расстояние невооруженным глазом, но для атомного мира оно все еще велико. Вычислить это довольно просто самостоятельно, заменив числа в правиле хода часов Фейнмана^[13]. Ответом будет где-то триллион полных оборотов стрелки. Только представьте себе масштабы сопутствующей интерференции.

В результате песчинка остается на своем месте, и практически нет шансов, что она перепрыгнет на существенное расстояние, хотя для получения этого вывода мы реально учитывали возможность того, что она может тайно выпрыгнуть куда-то в другую точку Вселенной.

И этот результат очень важен. Если вы сами подставили числа в формулу, то уже понимаете, почему это так: дело в ничтожной величине постоянной Планка. Если записать ее полностью, получится 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 662 6 кг·м²/с.

Если разделить почти любое привычное нам число на это, получится множество оборотов стрелок и огромная интерференция, так что все экзотические перемещения нашей песчинки по Вселенной отменяют друг друга, и эту путешественницу через пространство мы будем воспринимать лишь как скучную пылинку, неподвижно лежащую на пляже.

Мы, разумеется, особенно интересуемся теми случаями, когда циферблаты не отменяют друг друга. Как мы уже видели, это происходит, если стрелка проходит не более одного оборота. В этом случае неконтролируемой интерференции не будет. Посмотрим, что это значит с количественной точки зрения.

Возвращаемся к группе циферблатов, заново нарисовав ее на рис. 4.4, но на этот раз вместо работы с точными числами будем рассуждать более абстрактно. Предположим, что область, в которой расположена группа циферблатов, имеет размер Δx , а расстояние до ближайшей точки области от точки X равно x . В этом случае размер области Δx соответствует неопределенности нашего знания о начальном положении частицы; она стартует откуда-то из области размера Δx . Начиная с точки 1, которая находится в исходной области и ближе всего к точке X , мы должны поворачивать часы соответственно прыжку из этой точки в точку X на величину

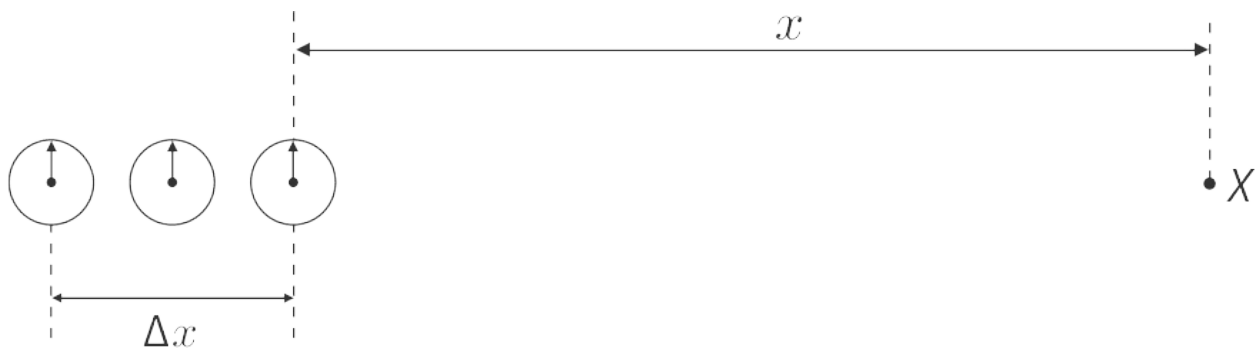


Рис. 4.4. Он изображает то же самое, что и рис. 4.3, с тем исключением, что нет ограничения конкретной величиной размера группы циферблатов или расстоянием до точки X

$$W_1 = \frac{m x^2}{2 h t} .$$

Теперь перейдем к самой удаленной точке – точке 3. Когда мы переносим циферблат из этой точки в точку X, стрелка поворачивается на большую величину, а именно

$$W_3 = \frac{m (x + \Delta x)^2}{2 h t} .$$

Теперь мы можем точно сформулировать условие, при котором циферблаты, прибывающие в точку X из всех точек исходного поля, не аннулировали бы друг друга: разница между циферблатами, прибывшими из точек 1 и 3, должна быть меньше одного полного оборота, то есть

$$W_3 - W_1 < \text{один оборот} .$$

Если записать это полностью, мы получим

$$\frac{m(x + \Delta x)^2}{2\hbar t} - \frac{mx^2}{2\hbar t} < 1.$$

Рассмотрим конкретный случай, в котором размер области Δx будет много меньше расстояния x . Это значит, что мы исследуем условия, при которых частица совершит скачок значительно больший, чем диаметр ее исходной области. В этом случае условие, при котором циферблаты не отменяют друг друга, выводится непосредственно из предыдущего неравенства и выглядит как

$$\frac{mx \Delta x}{\hbar t} < 1.$$

Если вы немного знаете математику, то поймете, как это получается – с помощью перемножения членов в скобках и пренебрежения той частью, которая включает в себя $(\Delta x)^2$. Это можно сделать, потому что по условиям Δx по сравнению с x – величина очень малая, а малая величина в квадрате – это очень малая величина.

Это уравнение включает в себе условие, при котором циферблаты в точке X не отменяют друг друга. Мы знаем, что если циферблаты не аннулируются взаимно в определенной точке, то существуют хорошие шансы обнаружить в этой точке частицу. Итак, мы выяснили, что если частица изначально расположена внутри области размером Δx , то через время t существуют хорошие шансы найти ее на значительном расстоянии x от поля, если неравенство выше будет выполнено. Более того, это расстояние увеличивается со временем, потому что в формуле мы на время t делим. Иными словами, чем больше времени проходит, тем выше вероятность нахождения частицы довольно далеко от ее исходного положения. Тут мы начинаем подозревать, что частица все-таки двигается. Заметьте также, что шансы нахождения частицы вдалеке от исходной точки увеличиваются, если Δx уменьшается – то есть если неопределенность исходного положения частицы становится меньше. Иными словами, чем более точно мы улавливаем частицу, тем быстрее она удаляется от исходного положения. Теперь это уже очень напоминает принцип неопределенности Гейзенберга.

Напоследок давайте немного переформулируем наше неравенство. Заметьте: чтобы частица проделала путь из любой точки исходной области до точки X за время t , она должна пройти расстояние x . Если вы действительно зарегистрировали частицу в точке X , то, разумеется, пришли к выводу, что частица передвигалась со скоростью x / t . Кроме того, напомним, что масса, умноженная на скорость частицы, есть ее импульс, поэтому величина mx / t – это измеренный нами импульс частицы. Теперь можно продвинуться еще дальше и вновь упростить неравенство, записав

$$\frac{p \Delta x}{h} < 1,$$

где p – импульс. Можно переформулировать уравнение так, что оно примет вид

$$p \Delta x < h,$$

и это действительно заслуживает дальнейшего обсуждения, потому что данное уравнение уже очень сильно напоминает принцип неопределенности Гейзенберга.

Итак, наши математические расчеты пока окончены, и, если вы не очень пристально следили за ними, вам следует ухватить нить рассуждений с этого момента.

Если начать с частицы, находящейся внутри связной области размером Δx , то, как мы установили, с течением времени она может оказаться где угодно внутри более крупной области размером x .

Эта ситуация показана на рис. 4.5. Точнее говоря, это значит, что, если бы мы искали частицу в начальный момент, были бы шансы найти ее где-то во внутренней области. Если бы мы не стали проводить измерения, а решили подождать, высоки были бы шансы найти ее где-то во внешней, более крупной связной области. Это значит, что частица могла перейти из точки внутри малой начальной области в точку внутри более крупной. Однако она не обязана была двигаться, так что до сих пор есть вероятность нахождения ее в меньшей области Δx . Но вполне возможно, что измерения покажут, что частица дошла как раз до края большой области^[14]. Если бы этот предельный случай был реализован при измерении, то мы

заклучили бы, что частица движется с импульсом, который задается только что выведенным нами уравнением (если вы не следовали за нашими математическими рассуждениями, просто примите это на веру), то есть $p = h / \Delta x$.

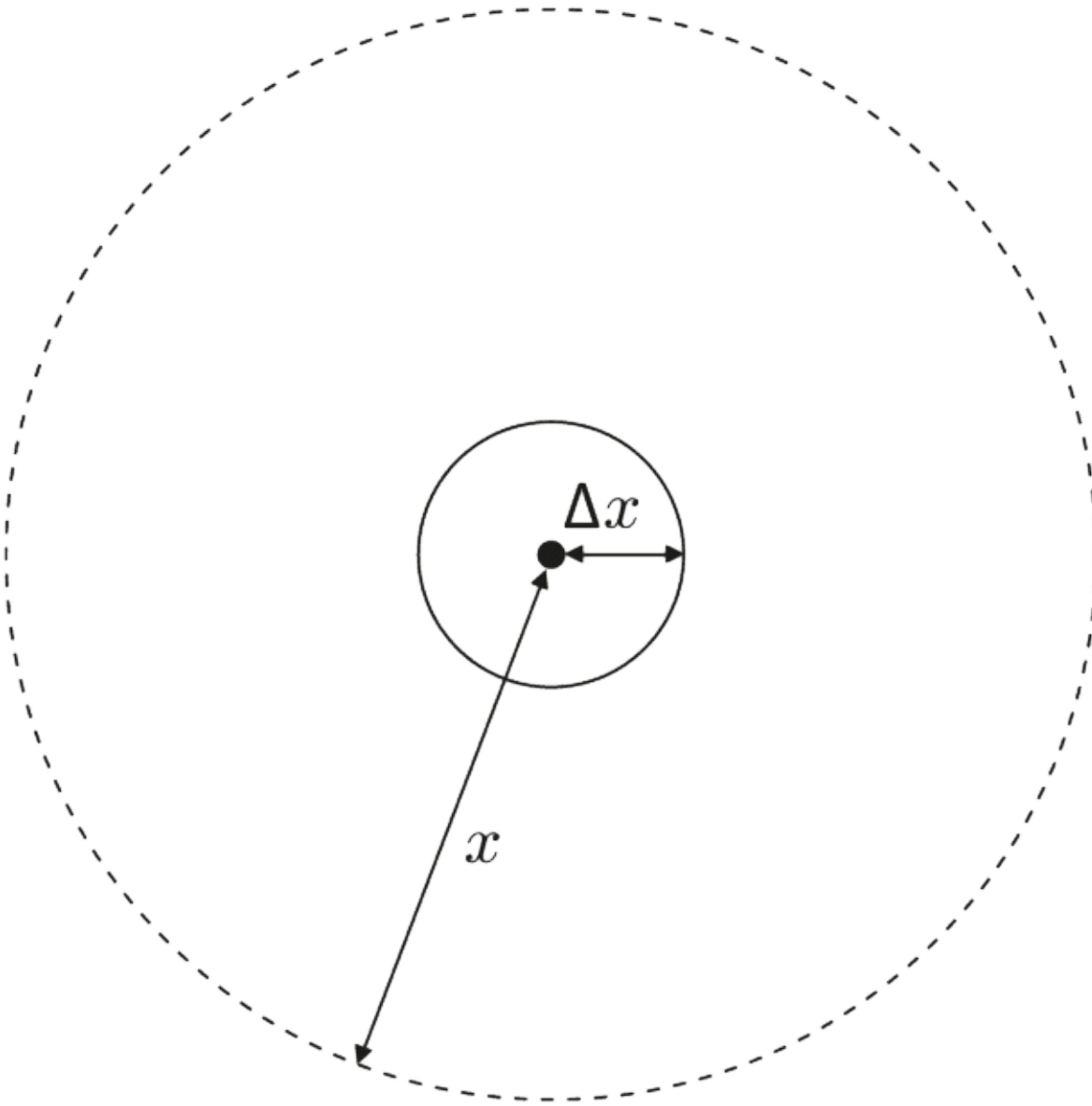


Рис. 4.5. Небольшая область со временем растет, в то время как изначально локализованная там частица с течением времени делокализуется

Теперь можем опять начать сначала и вернуть все в исходное положение. Частица опять окажется в малой области размера Δx . После измерения мы, вероятно, найдем частицу в какой-то другой точке внутри

более крупной области, до границы, и таким образом придем к выводу, что ее импульс меньше предельного значения.

Если мы представим, что вновь и вновь повторяем этот эксперимент, измеряя импульс частицы, которая первоначально находится внутри небольшой области размером Δx , мы обычно будем получать при измерении множество значений p где-то между нулем и предельным значением $h / \Delta x$. Фраза «если проделать этот эксперимент несколько раз, то можно предсказать, что измеренный импульс окажется в пределах между нулем и $h / \Delta x$ » значит, что «импульс частицы имеет неопределенность $h / \Delta x$ ». Как и в случае с неопределенностью положения, физики ввели для неопределенности этого рода символ Δp и пишут, что $\Delta p \Delta x \sim h$. Значок \sim обозначает, что произведение неопределенностей положения и импульса примерно равно постоянной Планка – оно может быть или немного больше, или немного меньше. Немного углубившись в математику, можно сделать это уравнение еще более точным. Результат будет зависеть от подробностей расположения первоначальной группы циферблатов, но не стоит тратить на него слишком много сил и времени, потому что уже сделанного достаточно, чтобы понять основные идеи.

Утверждение, что неопределенность положения частицы, умноженная на неопределенность ее импульса (приблизительно), равна постоянной Планка – возможно, самая известная формулировка принципа неопределенности Гейзенберга. Эта формулировка гласит: если мы знаем, что частица находится в какой-то исходный момент времени в какой-то области, то измерение положения частицы в какой-то более поздний момент времени покажет, что частица движется с импульсом, значение которого нельзя предсказать точнее, чем «нечто между нулем и $h / \Delta x$ ». Иными словами, если мы будем все больше и больше сужать начальную область нахождения частицы, она будет стремиться отпрыгнуть от этой области все дальше. Это настолько важно, что заслуживает третьего варианта формулировки: чем точнее вы знаете положение частицы в какой-то момент, тем хуже будете знать скорость ее движения и, соответственно, ту точку, в которой она окажется позже.

Эта формулировка принципа неопределенности как раз и принадлежит Гейзенбергу. Она лежит в основе квантовой теории, но тут мы должны четко заявить, что сам по себе принцип вовсе не является неопределенным. Это утверждение о нашей неспособности точного отслеживания частицы, и здесь не больше места для квантового волшебства, чем в ньютоновой физике. На последних нескольких страницах мы вывели принцип неопределенности Гейзенберга из фундаментальных правил квантовой

физики, которые соответствуют правилам хода часов, сложения и вычитания циферблатов. И действительно, его происхождение кроется в нашем допущении, что частица через мгновение после измерения ее положения может оказаться в любом другом месте Вселенной. Диковатость нашего первого предположения, что частица может оказаться в совершенно произвольном месте Вселенной, была приручена с помощью неконтролируемой квантовой интерференции, и принцип неопределенности – это в каком-то смысле все, что осталось от исходной анархии.

Прежде чем двинуться дальше, мы должны сказать еще нечто очень важное об интерпретации принципа неопределенности. Не следует впадать в заблуждение, думая, что частица находится в каком-то конкретном единственном месте и что распространение исходных циферблатов отражает лишь ограниченность нашего понимания. Если мы считаем, что не можем правильно вывести принцип неопределенности, потому что не можем признать необходимость рассматривать все циферблаты из всех точек внутри исходной области, можно перемещать их по очереди в отдаленную точку X и потом складывать. Именно делая это, мы и получили наш результат, то есть нам пришлось предположить, что частица прибывает в X через суперпозицию многих возможных маршрутов.

Принципом Гейзенберга мы чуть позже воспользуемся для иллюстрации некоторых примеров из реального мира. Сейчас же достаточно и того, что нам удалось вывести один из ключевых результатов квантовой теории, не пользуясь ничем другим, кроме простых манипуляций с воображаемыми циферблатами.

Подставим в уравнения несколько цифр, чтобы добиться лучшего понимания предмета. Сколько нужно ждать возникновения существенной вероятности, что песчинка выпрыгнет из спичечного коробка? Предположим, что спичечный коробок имеет стенки длиной 3 см, а песчинка весит 1 мкг. Напомним, что условие для появления существенной вероятности перемещения песчинки на заданное расстояние определяется неравенством

$$\frac{m\Delta x}{\hbar t} < 1.$$

где Δx – размер коробка. Теперь подсчитаем, каким должно быть время t , если мы хотим, чтобы песчинка покрыла расстояние $x = 4$ см, что уверенно превосходит размеры спичечного коробка. С помощью очень несложной алгебры находим, что

$$t > \frac{m x \Delta x}{h},$$

после чего подставляем числа и обнаруживаем, что t должно быть больше, чем примерно 1021 секунд. Это около 6×10^{13} лет, то есть в 1000 раз больше возраста Вселенной. Так что, вероятно, этого не случится. Квантовая механика – странная штука, но не настолько странная, чтобы песчинка сама по себе выпрыгивала из спичечного коробка.

Завершая эту главу и переходя к следующей, сделаем еще одно, последнее наблюдение. Наш вывод принципа неопределенности основывался на конфигурации часов, показанной на рис. 4.4. Если говорить точнее, то мы установили исходную группу часов так, чтобы все стрелки были одинаковой длины и показывали одно и то же время. Это соответствует частице, находящейся в начальном состоянии покоя в определенной области пространства, – как, например, песчинка в спичечной коробке. Хотя мы выяснили, что частица, скорее всего, не будет пребывать в покое, мы также обнаружили, что для больших объектов – а для квантового мира песчинка действительно очень велика – это движение совершенно незаметно. Таким образом, какое-то движение в нашей теории есть, но это движение неощутимо для достаточно больших объектов. Похоже, мы упускаем из виду что-то важное, потому что крупные предметы на самом-то деле движутся, а квантовая теория, как мы помним, – это теория и малых, и больших объектов. Теперь мы должны обратиться к новой проблеме: как объяснить движение?

5. Движение как иллюзия

В предыдущей главе мы вывели принцип неопределенности Гейзенберга из размышлений над определенным исходным расположением циферблатов в небольшой области. Часы имели стрелки одинакового размера, указывавшие в одинаковом направлении. Мы выяснили, что это отображает частицу, которая находится в относительно стационарном состоянии, хотя квантовые законы предполагают, что она все же совершает некие перемещения. Сейчас мы зададим другую первоначальную конфигурацию, чтобы описать частицу в движении.

На рис. 5.1 новое сочетание циферблатов. Это по-прежнему группа циферблатов, соответствующая частице, первоначально расположенной вблизи от них. Стрелка в положении 1 указывает на 12, как и ранее, но все остальные стрелки в поле повернуты и показывают другое время. На этот раз мы нарисовали пять часов просто потому, что так рассуждения будут более наглядными, хотя мы по-прежнему должны представить циферблаты и между точками, где размещаются те, что мы нарисовали: по одному циферблату для каждой точки в области. Применим, как и ранее, правило квантовой теории и переместим эти циферблаты в точку X , находящуюся далеко от исходной группы, чтобы вновь описать то множество траекторий, по которым частица может переместиться из этой группы в точку X .

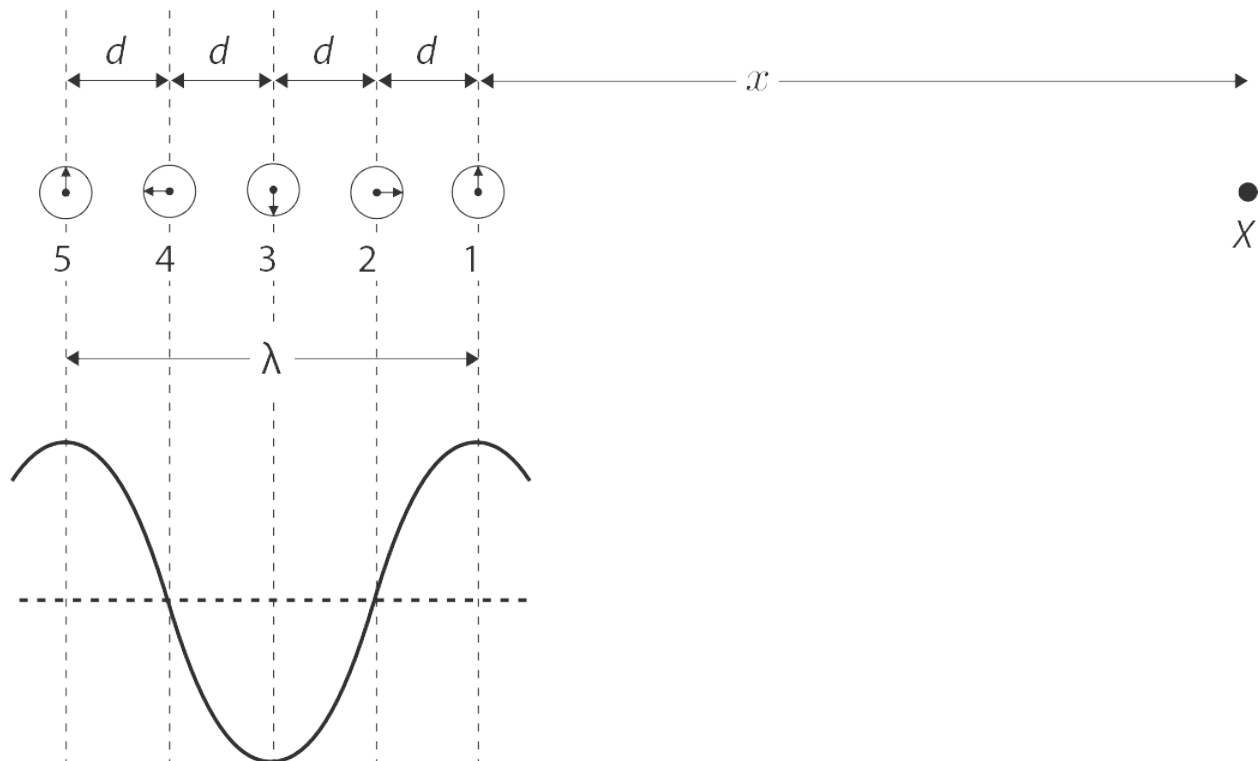


Рис. 5.1. Исходная группа (которую иллюстрируют циферблаты 1–5) состоит из часов, показывающих разное время – стрелки каждого последующих сдвинуты на три часа вперед по отношению к предыдущим. Нижняя часть рисунка демонстрирует, как отличается время на часах по всей группе

Повторим уже ставшую, надеемся, стандартной процедуру: возьмем циферблат из точки 1 и переместим в точку X , поворачивая стрелку в процессе этого перемещения. Она повернется на величину

$$W_1 = \frac{m\varphi^2}{2\hbar t}.$$

Теперь возьмем циферблат из точки 2 и переместим в точку X . Расстояние будет немного больше – допустим, что больше на d , и потребуется чуть больше повернуть стрелку:

$$W_2 = \frac{m (\varkappa + d)^2}{2ht}.$$

Именно это мы и делали в предыдущей главе, но, возможно, вы уже заметили, что для новой начальной конфигурации циферблатов результат будет не совсем тем же, что в прошлый раз. Новая установка стрелок отличается тем, что циферблат 2 изначально показывает время на три часа *вперед* по сравнению с циферблатом 1: 3 часа, а не 12. Но при переносе циферблата 2 в точку X мы должны повернуть стрелку *назад* чуть больше, чем на циферблате 1, в соответствии с тем дополнительным расстоянием d , которое он должен покрыть. Если построить исходную ситуацию так, что начальное опережение показаний циферблата 2 будет точно таким же, как дополнительный поворот стрелки в процессе движения в точку X , то циферблат 2 прибудет в точку X , *показывая точно такое же время*, как циферблат 1. Это будет означать, что произойдет не отмена, а суммирование циферблатов и создастся новый циферблат бóльших размеров, что, в свою очередь, означает наличие высокой вероятности нахождения частицы в точке X . Это совершенно не похоже на ту неконтролируемую квантовую интерференцию, случившуюся, когда все наши циферблаты показывали одинаковое время. Сейчас рассмотрим циферблат 3, который мы повернули на 6 часов вперед по сравнению с циферблатом 1. Этот циферблат должен пройти дополнительное расстояние $2d$ до точки X , и снова из-за смещения стрелки этот циферблат в точке прибытия будет показывать 12 часов. Если задать все смещения стрелок подобным образом, то же самое будет происходить по всей группе, так что все циферблаты в точке X будут суммироваться.

Это значит, что вероятность нахождения частицы в точке X в какое-то более позднее время будет достаточно высокой. Точка X отличается от других, потому что именно в ней все циферблаты из исходной группы, словно сговорившись, покажут одно и то же время. Но точка X – не единственная из имеющих особенный характер: все точки слева от X на расстоянии, равном размеру исходной группы, обладают тем же свойством: циферблаты в них тоже складываются с положительным результатом. Чтобы увидеть это, заметьте, что можно взять циферблат 2 и переместить его в точку на расстоянии d слева от X . Это будет соответствовать перемещению циферблата на расстояние x , а это то же самое расстояние, на которое мы переместили циферблат 1 по направлению

к точке X . После этого можно переместить циферблат 3 в эту новую точку на расстояние $x + d$, что будет тем же самым расстоянием, на которое мы до того переместили циферблат 2. Эти два циферблата, следовательно, тоже должны показывать одно и то же время в точке прибытия и суммироваться. Мы можем продолжать делать то же самое для всех циферблатов в исходной группе, но только до тех пор, пока расстояние слева от X не станет равно размеру исходной группы. За пределами этой особой области циферблаты в основном будут отменять друг друга, потому что останутся без защиты от обычной неконтролируемой квантовой интерференции^[15].

Истолкование этого эксперимента очевидно: группа циферблатов движется, как показывает рис. 5.2.

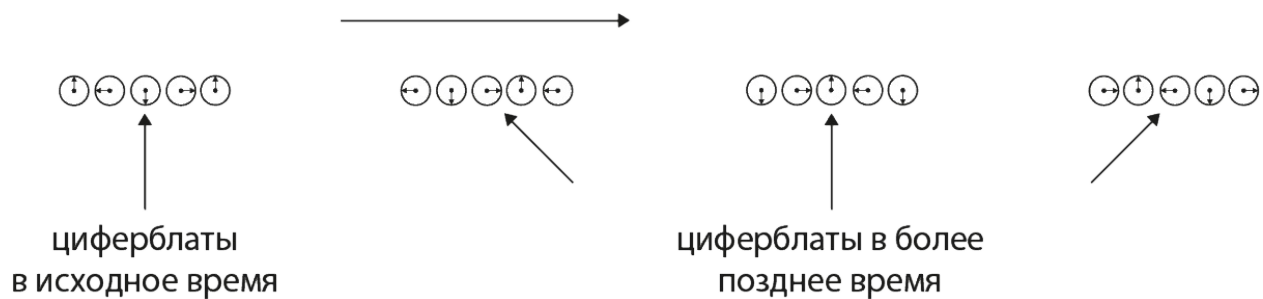


Рис. 5.2. Группа циферблатов с постоянной скоростью движется вправо. Это происходит потому, что в исходной группе стрелки циферблатов повернуты по отношению друг к другу так, как описано в тексте

Это удивительный результат. Задав начальную группу с помощью часов, показывающих разное, а не одинаковое время, мы пришли к описанию движущейся частицы. Интересно, что мы можем установить очень важную связь между часами со сдвинутыми стрелками и поведением волн.

Помните, что в главе 2 нам пришлось ввести идею циферблатов, чтобы объяснить волновое поведение частиц в двухщелевом эксперименте. Вернемся к [рис. 3.3](#), где мы изобразили набор циферблатов, описывающий волну. Он напоминает набор циферблатов в нашей движущейся группе. Соответствующую волну мы изобразили под группой циферблатов на рис. 5.1, пользуясь совершенно теми же методами, что и ранее: 12 часов – пик волны, 6 часов – ее минимум, а 3 и 9 часов соответствуют нулевой высоте волны.

Как мы могли предвидеть, представление движущейся частицы,

видимо, имеет что-то общее с волной. У волны есть длина, соответствующая расстоянию между циферблатами с идентичными показаниями стрелок. Мы изобразили ее на рисунке, обозначив буквой λ .

Сейчас можно вычислить, насколько далеко точка X должна располагаться от исходной группы, чтобы смежные циферблаты складывались с положительным значением. Это приводит нас к еще одному очень важному результату в квантовой механике и существенно проясняет связь между квантовыми частицами и волнами. Снова наступает момент, когда нам потребуется немного математики.

В первую очередь нужно вывести дополнительную величину, на которую повернута стрелка циферблата 2 по сравнению с циферблатом 1, поскольку дальше циферблат отправится в точку X . С помощью результатов из начала главы находим, что

$$W_2 - W_1 = \frac{m(x + d)^2 - mx^2}{2ht} \simeq \frac{mxd}{ht}.$$

Вы можете сами произвести вычисления, раскрыв скобки и отбросив величину d^2 , поскольку d – расстояние между циферблатами, которое слишком мало по сравнению с x – расстоянием до точки X , лежащей очень далеко от исходной области.

Довольно несложно записать критерий и для циферблатов, показывающих одно и то же время; нам нужно еще немного подвести стрелки, чтобы при продвижении циферблата 2 это исходное смещение показаний часов полностью компенсировало дополнительный поворот стрелки в ходе перемещения циферблата. Для примера, показанного на рис. 5.1, циферблат 2 дополнительно переводится на $\frac{1}{4}$, потому что мы должны будем повернуть стрелку на четверть часа вперед. Точно так же циферблат 3 подводится на $\frac{1}{2}$, потому что мы должны будем повернуть стрелку вперед на полчаса. Символически выразить долю полного оборота в виде d / λ , где d – расстояние между циферблатами, а λ – длина волны.

Если вы этого пока не улавливаете, рассмотрите случай, при котором расстояние между двумя циферблатами будет равняться длине волны. Тогда $d = \lambda$, а, следовательно, $d / \lambda = 1$, что соответствует одному полному обороту, при этом оба циферблата покажут одинаковое время.

Подытожим: чтобы два соседних циферблата показывали в точке X одинаковое время, требуется, чтобы дополнительный поворот часовой

стрелки в начальном положении равнялся дополнительному повороту часовой стрелки при распространении волны на расстояние:

$$\frac{m \times d}{h t} = \frac{d}{\lambda}.$$

Как и выше, можем упростить это выражение, отметив, что $m \times d / t$ – это импульс частицы, p . После небольших преобразований уравнения получим:

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Полученный результат настолько важен, что заслуживает собственного имени. И действительно, эта формула называется уравнением де Бройля, поскольку впервые в сентябре 1923 года ее предложил французский физик Луи де Бройль. Важность формулы в том, что она связывает длину волны с известным импульсом частицы. Иными словами, так проявляется тесная связь между свойством, обычно присутствующим у частиц – импульсом, и свойством, чаще всего ассоциирующимся с волнами, – длиной волны. Таким образом, из наших манипуляций с часами возник *корпускулярно-волновой дуализм квантовой механики*.

Уравнение де Бройля ознаменовало огромный концептуальный скачок. В своей оригинальной работе он писал, что «воображаемая связанная волна» должна приписываться всем частицам, в том числе электронам, и что поток электронов, проходя через щель, «должен демонстрировать феномен дифракции»^[16]. В 1923 году это были еще теоретические рассуждения, потому что Дэвиссон и Джермер обнаружили появление интерференционной фигуры при испускании пучков электронов только в 1927-м. Эйнштейн сделал примерно то же предположение, что и де Бройль, на других основаниях и приблизительно в это же время. Эти два теоретических результата стали катализатором для развития волновой механики Шрёдингера. В работе, вслед за которой Шрёдингер уже опубликовал уравнение своего имени, он писал: «Нам приходится серьезно отнестись к волновой теории де Бройля – Эйнштейна о движении частиц».

Мы можем подробнее разобраться с уравнением де Бройля и посмотреть, что произойдет, если уменьшить длину волны, что будет соответствовать большему смещению часовой стрелки соседних циферблатов. Иными словами, сократим расстояние между циферблатами, показывающими одно и то же время. Это значит, что нужно увеличить расстояние x , чтобы компенсировать сокращение λ , – то есть для погашения дополнительной подкрутки стрелок точка X должна оказаться дальше. Это соответствует более быстрому движению частицы: чем меньше длина волны, тем больше импульс, о чем и говорит уравнение де Бройля. Отличный результат: нам удалось «вывести» обычное движение (потому что со временем группа циферблатов движется равномерно), начав со статичного ряда циферблатов.

Волновые пакеты

Теперь вернемся к важному вопросу, который до того мы в этой главе пропустили. Мы сказали, что исходная группа целиком движется к окрестностям точки X , но лишь примерно сохраняет свою исходную конфигурацию.

Что мы имеем в виду под этим довольно туманным утверждением? Ответ снова связан с принципом неопределенности Гейзенберга и приводит нас к следующему открытию. Мы описывали происходящее с группой циферблатов, которая служит отображением частицы, находящейся где-то в малой области пространства. Эта область представлена на рис. 5.1 пятью циферблатами. Подобная группа называется *волновым пакетом*. Но мы уже видели, что локализация частицы в какой-то области пространства имеет свои последствия. Мы не можем воспрепятствовать тому, что локализованная частица получит «удар Гейзенберга» (то есть импульс ее будет неизвестен как раз ввиду ее локализации), и со временем это приведет к тому, что частица «просочится» за пределы области своего исходного расположения.

Этот эффект имеет место в случае, когда все циферблаты показывают одинаковое время; присутствует он и в случае перемещения группы циферблатов. Это приведет к такому распространению волнового пакета по мере движения, которое соответствует стационарному движению одиночной частицы.

Если подождать достаточно долго, то волновой пакет, которому соответствует движущаяся группа часов, полностью распадется, и мы потеряем все шансы на предсказание точного положения частицы. Это, разумеется, будет иметь место при любых попытках измерения скорости нашей частицы. Посмотрим, как это работает.

Хороший способ измерить скорость частицы – провести два измерения ее положения в два разных момента времени. После этого мы можем вывести ее скорость, разделив пройденное ею расстояние на время между двумя измерениями. Учитывая то, что мы сказали, это кажется опасным, потому что, если мы слишком точно измерим положение частицы, можем сжать весь волновой пакет, что изменит его последующее движение. Если же мы не хотим, чтобы частица получила значительный «удар Гейзенберга» (то есть существенный импульс, потому что Δx становится слишком малым), то должны убедиться, что наши измерения положения

будут достаточно расплывчатыми. Конечно, слово «расплывчатый» слишком расплывчато, так что давайте его как-то определим. Если воспользоваться детектором частиц, способным определять частицы с точностью 1 мкм, а наш волновой пакет имеет ширину 1 нм, то детектор не окажет почти никакого воздействия на эту частицу. Экспериментатор, получающий данные с детектора, был бы счастлив иметь разрешение в 1 микрон, но с точки зрения электрона все, что может детектор, – это сообщить экспериментатору, что частица находится в некоем огромном ящике, который в тысячу раз больше, чем существующий волновой пакет. В этом случае «удар Гейзенберга», вызванный процессом измерений, будет очень мал по сравнению с тем, который порождается конечным размером самого волнового пакета. Вот что мы имеем в виду под словами «достаточно расплывчатый».

Мы рисовали эту ситуацию на рис. 5.3, обозначив исходную ширину волнового пакета d и разрешение нашего детектора Δ .

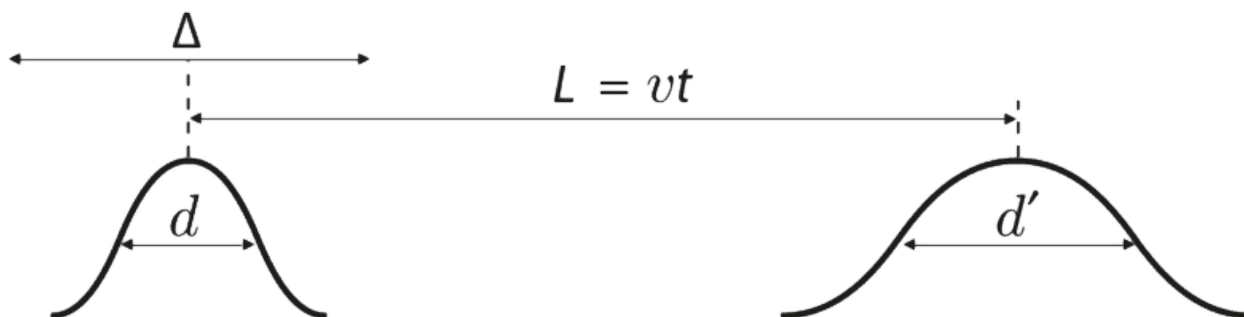


Рис. 5.3. Волновой пакет в два разных момента времени. Пакет движется вправо и распространяется с течением времени. Пакет движется, потому что стрелки часов, которые его составляют, смещены относительно друг друга (де Бройль), и распространяется в соответствии с принципом неопределенности. Форма волнового пакета не так важна, но для полноты картины следует сказать, что если пакет большой, то циферблаты будут большими, а если пакет маленький, то небольшими будут и циферблаты

Мы изобразили также волновой пакет в более позднее время: он стал немного шире и имеет ширину d' , которая больше, чем d . Максимум волнового пакета проходит расстояние L за временной интервал t со скоростью v . Приносим извинения, если эта формула навела вам давно забытые школьные дни, бездарно просиженные за исчерканной и покореженной деревянной партой, и голос учителя физики, теряющийся в полумраке зимнего дня и вгоняющий в совершенно неуместную дремоту. Мы покрываемся тут меловой пылью по серьезной причине и надеемся,

что заключение этой главы вернет вас в сознание эффективнее, чем летающая тряпка для вытирания доски в детстве.

Снова оказавшись в нашей метафорической научной лаборатории, мы пытаемся измерить скорость v волнового пакета, выполнив два измерения его положения в два разных мгновения. Это даст нам расстояние L , которое волновой пакет покрыл за время t . Но разрешение нашего детектора равно Δ , так что мы не сможем точно вычислить L . В символической форме можно записать, что измеренная скорость равна

$$v = \frac{L \pm \Delta}{t},$$

где знак плюс-минус просто напоминает, что если мы проводим два измерения положения, то получаем обычно не L , а скорее « L плюс чуть-чуть» или « L минус чуть-чуть», где «чуть-чуть» получается благодаря тому, что мы согласились не измерять положение частицы слишком точно. Важно принять во внимание, что L мы в действительности измерить не можем: мы всегда получаем значение где-то в диапазоне $L \pm \Delta$. Помните также, что величина Δ должна быть гораздо больше, чем размер волнового пакета, иначе частица сожмется и разрушит его. Немного перепишем последнее уравнение, чтобы лучше понять, что происходит:

$$v = \frac{L}{t} \pm \frac{\Delta}{t}.$$

Оказывается, что, если величина t будет очень большой, мы выполним измерение скорости $v = L / t$ с весьма незначительной погрешностью, потому что можем ждать очень долго, добиться, чтобы t было сколь угодно большим, а Δ / t , соответственно, сколь угодно малым, притом что величина Δ продолжит оставаться достаточно великой. Поэтому кажется, что мы нашли отличный способ все же совершить точные вычисления скорости этой частицы, не вмешиваясь в ее ход: достаточно лишь долго подождать между первым и вторым измерениями. С точки зрения интуиции все прекрасно и логично. Представьте, что вы замеряете скорость автомобиля, движущегося по шоссе. Если замерите расстояние, которое он проедет за одну минуту, то вы, конечно, получите значительно более

точный показатель его скорости, чем если интервал между измерениями составит одну секунду. Итак, мы обманули Гейзенберга?

Конечно, нет: мы забыли кое-что учесть. Частица описывается волновым пакетом, который рассеивается с течением времени. При наличии достаточного времени рассеяние окончательно размоет волновой пакет, так что частица может оказаться где угодно. Это увеличит диапазон значений, которые мы получим при измерении L , и перекроет нам возможность совершать сколь угодно точное вычисление скорости частицы.

Имея дело с частицей, описываемой волновым пакетом, мы все равно ограничены принципом неопределенности. Так как изначально частица находится где-то в области размером d , Гейзенберг информирует нас, что импульс частицы соответствующим образом искажается на величину h/d . Поэтому есть только один способ построения такой конфигурации циферблатов, чтобы представленная на ней частица двигалась с определенным импульсом, – нужно сделать d , то есть размер волнового пакета, очень большим. И чем больше он будет, тем меньше окажется неопределенность импульса частицы. Урок ясен: частица с хорошо известным импульсом описывается большой группой циферблатов^[17]. Точнее говоря, частица с совершенно точно известным импульсом будет описана бесконечно длинной группой циферблатов, что означает бесконечно длинный волновой пакет.

Мы только что показали, что волновому пакету конечного размера не соответствует частица с определенным импульсом. Это значит, что, если измерить импульс очень большого количества частиц, которые описываются одним и тем же исходным волновым пакетом, мы не получим каждый раз один и тот же результат. Напротив, мы получим широкий набор разных ответов, и их разброс, как бы хороши мы ни были в экспериментальной физике, не может оказаться меньше, чем h/d .

Таким образом, мы можем сказать, что волновой пакет описывает частицу, которая движется с импульсом, определенным в рамках некоторого диапазона. Но уравнение де Бройля подразумевает, что в последнем предложении можно заменить слово «импульсы» словами «длины волн», потому что импульс частицы связан с волной определенной длины. Это, в свою очередь, означает, что волновой пакет должен состоять из волн разной длины. Точно так же, если частица описывается волной определенной длины, такая волна должна быть бесконечной. Кажется, нас подталкивают к выводу, что небольшой волновой пакет состоит из многих бесконечных волн разной длины. И действительно,

нас побуждают двигаться по этому пути, и то, что мы описываем, хорошо знакомо математикам, физикам и инженерам. Мы входим в область математики, известную как анализ Фурье и названную в честь французского физика Жозефа Фурье.

Фурье был колоритной личностью. Среди его многочисленных достижений – губернаторство в Нижнем Египте при Наполеоне и открытие парникового эффекта. По слухам, ему нравилось заворачиваться в простыни, что в итоге привело к его безвременной кончине в 1830 году, когда он, плотно завернувшись, упал с собственной лестницы. Его главная аналитическая работа касалась теплопроводности твердого тела и была опубликована в 1807 году, хотя основная идея известна с гораздо более раннего времени.

Фурье показал, что абсолютно любая волна сколь угодно сложной формы и любого размера может быть получена сложением ряда волн-синусоид разной длины. Лучше всего показать это с помощью иллюстрации. На рис. 5.4 пунктирная кривая получается при сложении двух первых волн-синусоид на нижних графиках. Вы можете сложить их едва ли не в уме: обе волны имеют максимальную высоту в центре, так что складываются именно там, а на концах гасят друг друга. Штриховая кривая – это результат сложения всех четырех волн, показанных на нижних графиках, и в ней пик в центре еще более выражен. Наконец, непрерывная кривая показывает, что произойдет при сложении первых десяти волн, то есть четырех приведенных на иллюстрации плюс еще шести с последовательно уменьшающейся длиной. Чем больше мы добавляем волн, тем больше подробностей можем увидеть в результате. Волновой пакет на верхнем графике может описать локализованную частицу, в отличие от волнового пакета, изображенного на рис. 5.3. Таким образом, появляется реальная возможность синтезировать волну любой формы – и все это с помощью сложения простых волн-синусоид.

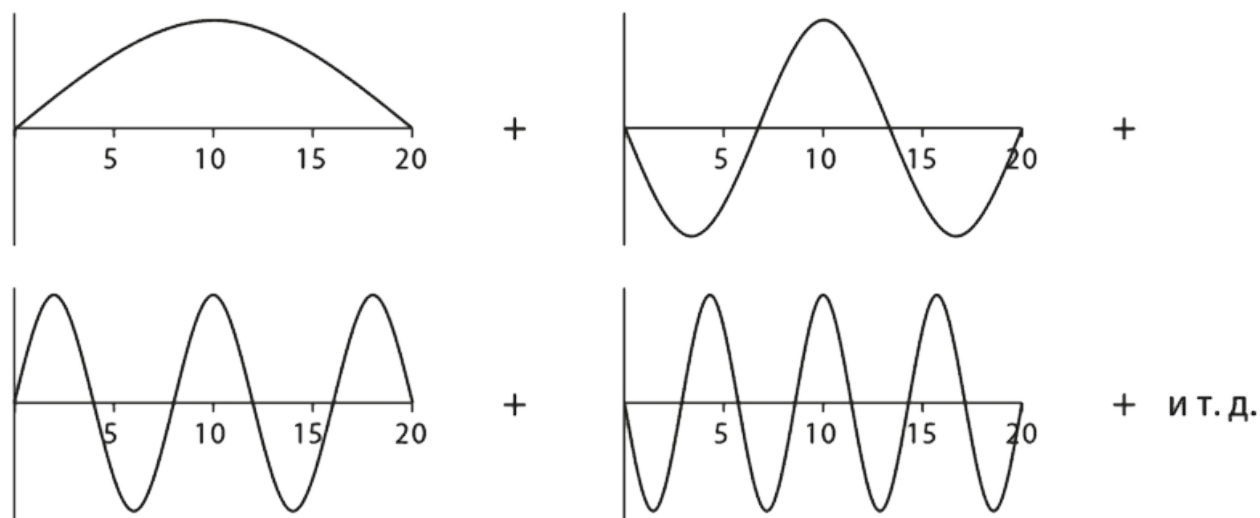
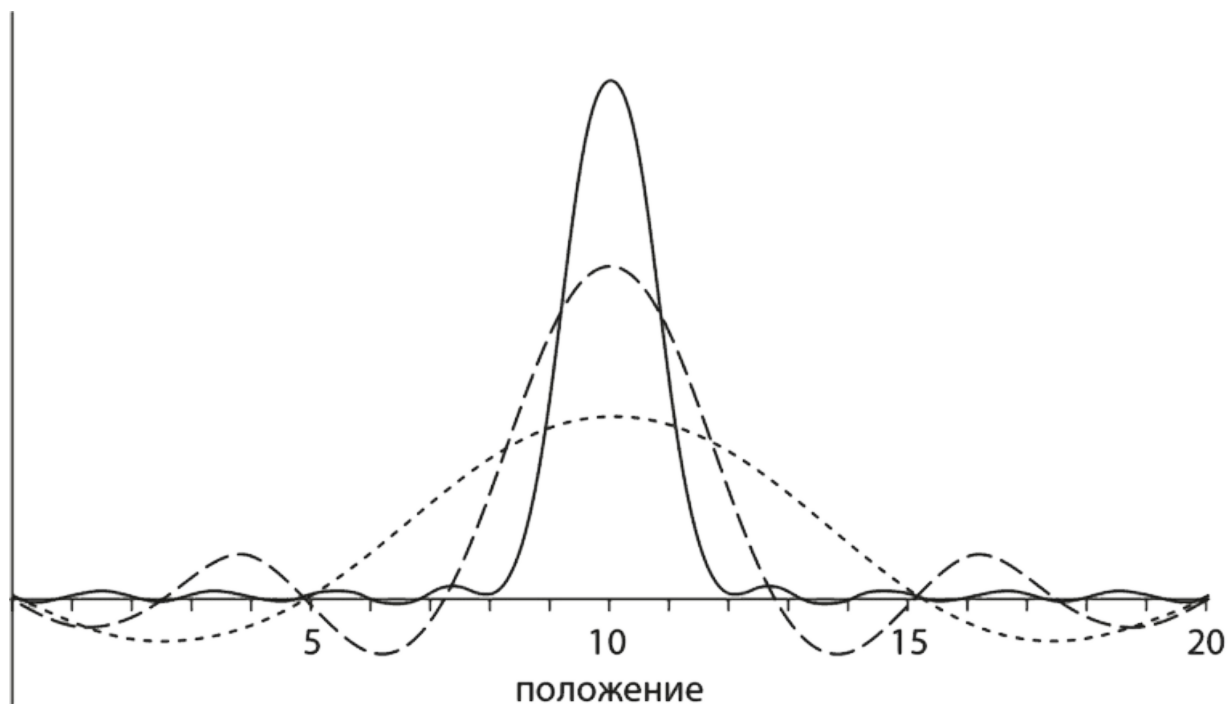


Рис. 5.4. Верхний график: сложение нескольких волн-синусоид дает в результате волновой пакет с резким пиком. Пунктирная кривая состоит из меньшего количества волн, чем штриховая, а та, в свою очередь, из меньшего, чем непрерывная. Нижние графики: первые четыре волны составляют волновой пакет на верхнем графике

Уравнение де Бройля сообщает нам, что каждая волна на нижних графиках рис. 5.4 соответствует частице с определенным импульсом, и этот импульс увеличивается с уменьшением длины волны.

Теперь становится более понятно, почему частица, описываемая локализованной группой циферблатов, должна обязательно иметь диапазон импульсов.

Продолжим пояснения и предположим, что частица описывается группой циферблатов, представленных непрерывной кривой на верхнем графике рис. 5.4^[18]. Мы только что выяснили, что эту частицу можно описать и рядом гораздо более длинных групп циферблатов: первая волна с нижнего графика, плюс вторая волна с нижнего графика, плюс третья волна с нижнего графика и т. д. В этом случае в каждой точке оказывается несколько циферблатов (по одному из каждой длинной группы), которые мы должны сложить, чтобы получился единичный циферблат, представленный на верхнем графике рис. 5.4. Выбор метода представления частицы полностью зависит от вас: можно считать, что она представлена одним циферблатом в каждой точке (в этом случае размер циферблата непосредственно поясняет, где вероятнее всего обнаружить частицу, а именно в окрестности пика верхнего графика рис. 5.4). Или же можно считать, что она описывается как математический ряд циферблатов в любой точке, каждый из которых соответствует одному из возможных значений импульса частицы. Таким способом разложения в ряд мы напоминаем себе, что частица, локализованная в небольшой области пространства, не имеет определенного импульса. Невозможность построить компактный волновой пакет из волн одной-единственной длины – очевидная особенность математики Фурье.

Такой образ мысли дает возможность по-новому взглянуть на принцип неопределенности Гейзенберга. Он утверждает, что мы не можем описать частицу как локализованную группу циферблатов, если эти циферблаты соответствуют волнам только одной длины. Напротив, чтобы циферблаты отменяли друг друга за пределами локализованной области, мы обязаны смешивать волны разной длины, а следовательно, и разного импульса. Итак, цена, которую мы платим за локализацию частицы в какой-то области пространства, состоит в том, что мы не знаем ее импульса. Более того, чем сильнее мы ограничиваем область возможного местоположения частицы, тем больше волн разной длины нужно добавлять и тем хуже мы знаем импульс частицы. Именно это и составляет содержание принципа неопределенности, и очень приятно, что мы пришли к тому же выводу

иным путем^[19].

Завершая эту главу, мы хотели бы еще немного поговорить об анализе Фурье. Это очень хорошее средство описания квантовой теории, и оно тесно связано с идеями, которые мы как раз обсуждаем. Важно, что каждая квантовая частица, что бы она ни делала, описывается волновой функцией. Как мы уже говорили, волновая функция – это просто ряд небольших циферблатов, по одному для каждой точки в пространстве, – а размер циферблата определяет вероятность нахождения частицы в конкретной точке. Такой метод представления частицы носит название *волновой функции пространственного положения*, поскольку непосредственно связан с возможными положениями, которые может иметь частица. Однако есть много вариантов математического представления волновой функции, и маленькие циферблаты в пространственной версии – лишь один из них. Мы уже касались этого вопроса, когда говорили, что можно представить частицу в виде суммы волн-синусоид. Если ненадолго задержаться на этой возможности, легко понять, что составление полного списка волн-синусоид действительно дает исчерпывающее описание частицы (потому что при сложении этих волн можно получить циферблаты, связанные с волновой функцией пространственного положения).

Иными словами, если мы точно укажем, какие именно волны-синусоиды нужны нам для построения волнового пакета и с каким коэффициентом нужно прибавить каждую из волн-синусоид, чтобы получить нужную форму пакета, у нас получится иное, но полностью эквивалентное описание волнового пакета. Интересно, что любая волна-синусоида сама может быть описана одиночным воображаемым циферблатом: его размер отражает максимальную высоту волны, а фаза волны в определенной точке может быть представлена временем, на которое указывает стрелка. Таким образом, мы можем предпочесть представление частицы не через циферблаты в пространстве, но через альтернативный набор циферблатов – по одному для каждого возможного значения импульса частицы. Это описание столь же экономично, как и представление «циферблатов в пространстве», и вместо указания наиболее вероятного положения частицы мы указываем наиболее вероятные значения ее импульса. Этот альтернативный ряд циферблатов называется *волновой функцией пространства импульсов* и содержит ровно ту же информацию, что и волновая функция пространства положений^[20].

Возможно, это звучит очень абстрактно, но технология, основанная на идеях Фурье, успешно используется в повседневной жизни: разложение

волны на составляющие ее волны-синусоиды – это основа технологии аудио– и видеосжатия. Представьте себе звуковые волны, образующие вашу любимую мелодию. Эта сложная волна, как мы уже знаем, может быть разбита на составляющие с помощью ряда чисел, которые показывают относительный вклад каждой из множества волн-синусоид в получающийся звук. Оказывается, что, хотя для абсолютно точного воспроизведения исходного звука требуется множество отдельных волн-синусоид, можно отказаться от многих из них, что совершенно не скажется на восприятии качества аудиозаписи. Например, удаляются волны-синусоиды от звуков, не воспринимаемых человеческим слухом. Это существенно сокращает количество данных, которые нужны для хранения аудиофайла, поэтому ваши mp3-плееры не очень большие.

Можно задаться вопросом: как реально применить другую, еще более абстрактную версию волновой функции? Рассмотрим частицу, которая отображается одиночным циферблатом в представлении пространства положений. Так описывается частица, находящаяся в определенном месте Вселенной; в единственной точке – там, где расположен циферблат. Теперь рассмотрим частицу, которая отображается одиночным циферблатом в представлении пространства импульсов. Так описывается частица с единственным, точно определенным импульсом. Описание такой частицы с помощью волновой функции пространства положений потребует – по контрасту – бесконечного количества циферблатов одинакового размера, потому что, согласно принципу неопределенности, частица с точно определенным импульсом может находиться где угодно. В результате иногда проще производить вычисления непосредственно в терминах волновой функции пространства импульсов.

В этой главе мы выяснили, что описание частицы методом циферблатов способно схватывать суть того, что мы обычно называем «движением». Мы узнали, что наше восприятие равномерного движения объектов от одной точки к другой, согласно квантовой теории, является иллюзией. Более правдоподобно будет предположить, что частицы движутся из точки *A* в точку *B* всеми возможными путями. Только при сложении всех возможностей появляется движение в том виде, в каком мы его воспринимаем^[21]. Мы также ясно увидели, как описание с помощью циферблатов позволяет перейти к волновой физике даже несмотря на то, что мы имеем дело лишь с частицами, подобными точкам. Сейчас пора использовать это сходство с волновой физикой для ответа на важный вопрос: как квантовая теория объясняет структуру атомов?

6. Музыка атомов

Изнутри атом представляет собой нечто странное. Если, например, вы встанете на протон и посмотрите оттуда во внутриатомное пространство, то увидите лишь пустоту. Электроны будут слишком малы, чтобы их разглядеть, даже если окажутся на расстоянии вытянутой руки, но даже и это будет происходить слишком редко. Протон в диаметре равен примерно 10^{-15} м, то есть 0,000 000 000 000 001 метра, и по сравнению с электроном он просто квантовый колосс. Если вы стоите «на протоне» у побережья Англии, на белых скалах Дувра, то расплывчатые пределы атома расположатся где-то на фермах северной Франции. Атомы обширны и пусты, поэтому ваша полноразмерная версия тоже обширна и пуста. Простейший атом – это водород, состоящий из одного протона и одного электрона. Поскольку электрон исчезающе мал, может показаться, что область его движения безгранична, но это не так. Он прикреплен к протону взаимным электромагнитным притяжением, и именно размер и форма этой просторной тюрьмы определяют характерный штрихкод из цветов радуги, тщательно зафиксированный в *Handbuch der Spectroscopie* нашим старым приятелем и частым гостем профессором Кайзером.

Сейчас мы можем применить накопленные знания для решения вопроса, который ставил в тупик Резерфорда, Бора и других ученых в первые десятилетия XX века: что именно происходит внутри атома? Если помните, проблема состояла в том, что Резерфорд выяснил сходство атома в некоторых отношениях с миниатюрной Солнечной системой: Солнце как твердое ядро в центре, и электроны как планеты, вращающиеся по удаленным орбитам. Резерфорд знал, что эта модель не может быть верной, потому что электроны на орбитах вокруг ядра должны постоянно испускать свет. Результат должен быть для атома катастрофическим, потому что, если электрон постоянно испускает свет, он должен терять энергию и закручиваться по спирали в направлении неизбежного столкновения с протоном. Конечно, этого не происходит. Атомы довольно стабильны, поэтому в нарисованной картине что-то не так. Но что?

Эта глава очень важна для всей книги, потому что здесь мы впервые попытаемся с помощью нашей теории объяснить явления реального мира. Весь наш труд до этого момента носил теоретический характер: мы разрабатывали особый «формализм» – способы представления

квантовой частицы. Принцип неопределенности Гейзенберга и уравнение де Бройля стали венцом наших усилий, но в целом мы вели себя достаточно скромно, рассматривая Вселенную как состоящую из одной-единственной частицы. Теперь пора показать, как квантовая теория влияет на наш повседневный мир. Структура атомов – вещь исключительно реальная и осязаемая. Вы состоите из атомов: их строение – это ваше строение, их стабильность – ваша стабильность. Можно без особого преувеличения сказать, что понимание структуры атомов – одно из неперенных условий понимания Вселенной в целом.

В атоме водорода электрон заперт в области, окружающей протон. Начнем с того, что представим, будто этот электрон заперт в своего рода ящике, что, впрочем, не так далеко от истины. Мы займемся исследованием того, до какой степени физика электрона, запертого в маленьком ящике, отражает ключевые особенности реального атома. Мы продолжим использовать то, что усвоили из предыдущей главы по поводу волновых свойств квантовых частиц: когда дело доходит до описания атомов, волновая картина действительно все упрощает, и мы можем добиться серьезного прогресса, не особенно беспокоясь по поводу уменьшения, добавления и смещения часов и их стрелок. Однако нужно все время держать в уме, что волны – это удобное приближение к тому, что происходит «под покровом». Так как структура, разработанная нами для квантовых частиц, очень близка к той, что описывает водяные волны, звуковые или волны гитарной струны, рассмотрим сначала поведение этих знакомых нам материальных волн в условиях определенного рода ограничений.

В целом следует сказать, что волны – сложные объекты. Представьте, что вы прыгаете в бассейн, полный воды. Вода немедленно начнет расплескиваться, и, кажется, не получится описать происходящее какими-то простыми методами. Однако за этой сложностью таится скрытая простота. Ключевым фактором будет ограниченность воды бассейном, то есть все волны в нем заперты. Это порождает феномен, известный под названием *стоячей волны*. Стоячие волны скрыты от нас в том беспорядке, который мы видим после своего прыжка в бассейн, но есть способ заставить воду «осциллировать» – двигаться в форме регулярных, повторяющихся колебаний стоячих волн. Рис. 6.1 показывает, как выглядит водная поверхность после того, как подвергнется одному такому колебанию. Максимумы и минимумы восходят и нисходят, но самое важное – то, что они восходят и нисходят строго в одном и том же месте. Есть и другие стоячие волны, в том числе такая, где вода в центре цистерны

ритмически поднимается и опускается. Эти особые волны мы обычно не видим, потому что их трудно создать, но смысл в том, что абсолютно любое возмущение воды – даже вызванное нашим не самым элегантным нырком и последующей отчаянной молотьбой руками – может быть представлено в виде некоего сочетания различных стоячих волн. Мы уже встречались с таким типом поведения – это прямое обобщение идей Фурье, с которыми мы познакомились в прошлой главе.

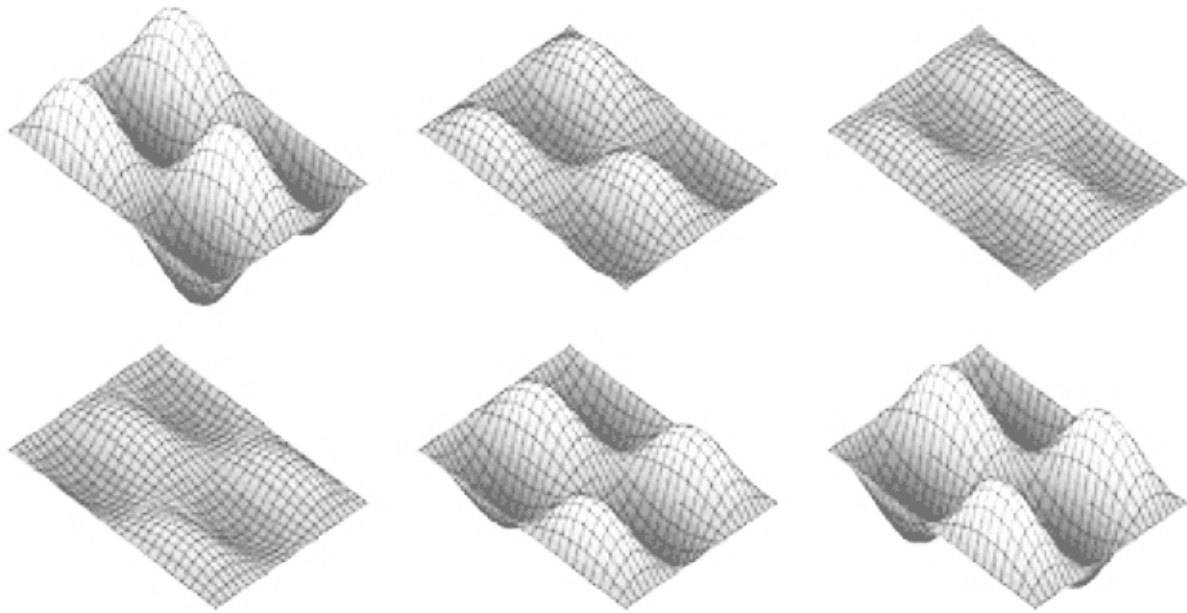


Рис. 6.1. Шесть последовательных срезов стоячей волны в цистерне с водой. Ось времени направлена от верхнего левого к нижнему правому снимку

Там мы видели, что любой волновой пакет может состоять из сочетания волн определенной длины. Эти особые волны, отражающие состояние частицы с определенным импульсом, – синусоиды. В случае с запертыми водяными волнами можно сделать обобщение, что любое возмущение воды всегда можно описать с помощью какого-то сочетания стоячих волн. Позже в этой главе мы увидим, что стоячие волны имеют в квантовой теории важную интерпретацию: собственно говоря, в них содержится ключ к пониманию строения атома. Держа это в уме, рассмотрим стоячие волны более пристально.

На рис. 6.2 показан еще один пример стоячих волн в природе – три из множества возможных стоячих волн на гитарной струне. Когда мы трогаем гитарную струну, мы слышим звук, который определяется стоячей волной наибольшей длины – первой из трех, показанных на рисунке.

И в физике, и в музыке это известно под названием низшей гармоник, или основного тона. Волны другой длины обычно тоже присутствуют и называются обертонами, или высшими гармониками.

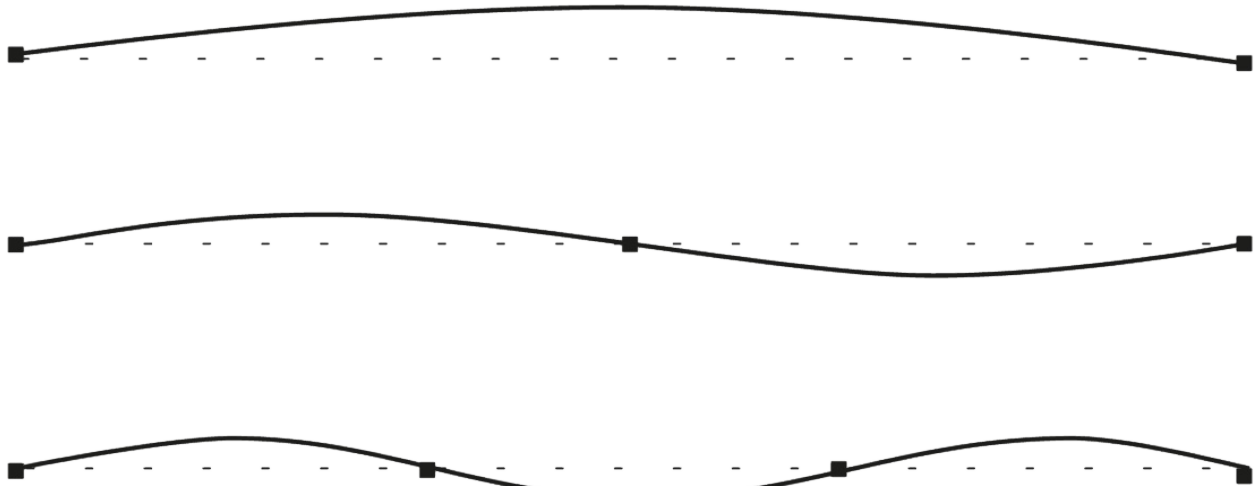


Рис. 6.2. Три волны наибольшей длины, которые могут возникнуть при переборе гитарной струны. Самая длинная волна (сверху) соответствует нижней гармонике (основному тону), а остальные – высшим гармоникам (обертонам)

Две другие волны на рисунке – это два обертона с наибольшими длинами волн.

Гитара – отличный пример: довольно легко понять, почему гитарная струна может вибрировать только на этих конкретных волнах. Дело в том, что она фиксирована на обоих концах: с одной стороны – кобылкой^[22], а с другой – пальцами, прижимающими струну к грифу. Это значит, что в двух этих точках струна не может двигаться, что и определяет разрешенные длины волн. Если вы играете на гитаре, вы инстинктивно понимаете такую физику: перебирая пальцами по грифу по направлению к кобылке, вы уменьшаете длину струны, тем самым заставляя ее колебаться с меньшей длиной волны, что соответствует более высоким нотам.

Нижняя гармоника – это волна, которая имеет всего две стационарные точки, или «узла»; во всех остальных точках она движется. Как видно на рисунке, длина волны звука равна двойной длине струны. Следующая, меньшая длина волны уже равняется длине струны, потому что мы можем видеть еще один узел в центре. Затем можно получить волну с длиной в $\frac{2}{3}$ длины струны и т. д.

В целом, как и в случае с водой, запертой в бассейне, струна будет вибрировать в каком-то сочетании различных возможных стоячих волн, в зависимости от того, как именно тронута струна. Конкретную форму струны всегда можно получить, сложив стоячие волны, соответствующие каждой из имеющихся гармоник.

Гармоники и их относительные размеры дают характерный тон звука. У разных гитар будет разное распределение гармоник, поэтому и звучать они будут по-разному, но среднее до (чистая гармоника) на одной гитаре практически совпадает со средним до на другой.

Для гитары форма стоячих волн очень проста: это чистые синусоиды, и их длина фиксирована длиной струны. Для случая с бассейном стоячие волны более сложные, что показано на рис. 6.1, но общая идея такая же.

Возможно, вас интересует, почему эти конкретные волны называются стоячими. Дело в том, что они не меняют своей формы. Если мы сделаем два снимка гитарной струны, колеблющейся в форме стоячей волны, то эти две фотографии будут отличаться только общим размером волны. Пики будут всегда находиться в одних и тех же местах, как и узлы, которые фиксируются концами струны или, в случае с бассейном, его бортиками.

С математической точки зрения можно сказать, что волны на двух фотографиях отличаются только общим множителем. Этот множитель периодически колеблется со временем и отражает ритмические колебания струны. То же самое верно и для бассейна на рис. 6.1, где каждая фотография отличается от остальных общим множителем. Например, последняя фотография может быть получена из первой посредством умножения высоты волны в каждой точке на -1 .

Иными словами, волны, каким-то образом ограниченные, всегда можно выразить в виде суммы стоячих волн (то есть тех, которые не меняют своей формы), и, как мы уже сказали, есть довольно серьезные причины посвятить им столько времени. Главная из них – стоячие волны квантованы. Это совершенно очевидно для стоячих волн на гитарной струне: длина основного тона в два раза превышает длину струны, а следующая по длине возможная волна равняется длине струны. Между этими двумя волнами стоячей волны с какой-либо промежуточной длиной быть не может, так что можно сказать, что разрешенные длины волн на гитарной струне квантованы.

Таким образом, с помощью стоячих волн проявляется следующее: «запирая» волны, мы что-то квантуем. В случае с гитарной струной это, очевидно, длина волны. В случае с электроном внутри ящика квантовые волны, соответствующие электрону, тоже будут заперты, и по аналогии

можно ожидать, что в ящике будут присутствовать лишь волны с определенным, конкретным набором длин волн, а, следовательно, нечто вновь будет квантовано. Другие волны просто не могут существовать, как гитарная струна не может одновременно звучать всеми нотами в октаве. И общее состояние электрона, как и звук гитары, описывается смещением стоячих волн. Эти квантовые стоячие волны начинают выглядеть очень интересно. Заинтригованы? Приступаем к анализу.

Чтобы продвинуться в своих исследованиях, мы должны уточнить форму ящика, в который помещаем наш электрон. Для простоты предположим, что электрон может свободно двигаться в области размером L , но ему полностью запрещено выходить за пределы этой области. Необязательно уточнять, каким образом мы собираемся запретить электрону это делать, но, если наша модель претендует на то, чтобы быть упрощенной моделью атома, нужно представить, что за это отвечает притяжение положительно заряженного ядра. На научном жаргоне это имеет название «прямоугольная потенциальная яма». Мы зарисовали эту ситуацию на рис. 6.3, и причины для такого названия представляются очевидными. Идея заключения частицы в потенциальной яме очень важна, мы обратимся к ней еще не раз, поэтому полезно убедиться, что мы точно понимаем, о чем идет речь. Как на самом деле можно улавливать частицы?

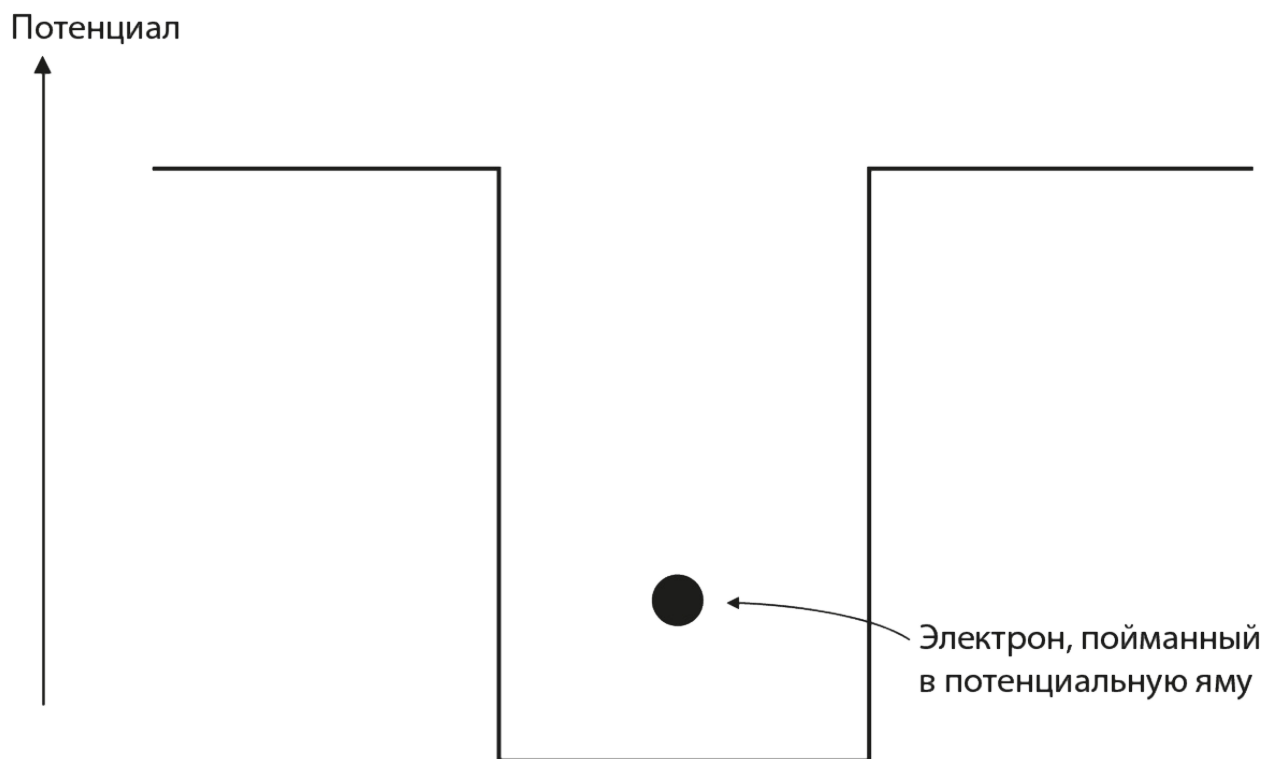


Рис. 6.3. Электрон, пойманный в прямоугольную потенциальную яму

Вопрос довольно сложный: чтобы добраться до его сути, нужно выяснить, как частицы взаимодействуют друг с другом, о чем пойдет речь в главе 10. Тем не менее мы можем добиться прогресса в рассуждениях, если не будем задавать слишком много вопросов.

Способность «не задавать слишком много вопросов» – необходимый для физика навык, потому что для получения хоть каких-то ответов где-то надо провести черту, так как ни одна система объектов не может быть полностью изолированной. Кажется разумным, что при желании понять, как работает микроволновая печь, не стоит интересоваться движением вокруг нее.

Все это движение окажет незначительное влияние на работу микроволновки. Оно вызовет колебания воздуха и земли, которые повлекут за собой небольшие сотрясения и самой печи. Могут появиться какие-то бродячие магнитные поля, которые повлияют на работу электроники, как бы хорошо она ни была защищена от подобных воздействий. Игнорируя такие вещи, легко допустить ошибку, так как можно упустить из виду действительно важные детали. Если так и произойдет, мы получим неверный ответ и будем вынуждены пересмотреть предположения. Это очень важный момент, напрямую связанный с научным успехом: все предположения в конце концов подтверждаются или опровергаются экспериментально. Арбитром является природа, а не человеческая интуиция. Поэтому наша стратегия – игнорировать подробности функционирования механизма удержания электрона и моделировать нечто под названием «потенциал». Слово «потенциал» на самом деле обозначает «воздействие на частицу какой-то физической или иной силы, которую я не очень хочу подробно объяснять». Мы, впрочем, позже подробно опишем методы взаимодействия частиц, а пока будем употреблять термин «потенциал». Если это звучит несколько бесцеремонно, рассмотрите пример, иллюстрирующий использование потенциалов в физике.

На рис. 6.4 изображен мяч, лежащий в долине. Если ударить по мячу, он может подняться, но лишь до определенного предела, после чего снова упадет. Это отличный пример частицы, пойманной потенциалом. В этом случае гравитационное поле Земли создает потенциал, а крутой холм порождает крутой потенциал. Нужно понимать, что мы можем вычислить подробности передвижения мяча по долине, не зная деталей того, как долина взаимодействует с мячом, потому что для этого пришлось бы знать еще и теорию квантовой электродинамики. Если окажется, что детали внутриатомного взаимодействия между атомами в долине и атомами в мяче

слишком сильно воздействуют на движение мяча, наши предсказания окажутся неверными. На самом деле внутриатомные взаимодействия важны, потому что из них возникает трение, но моделировать ситуацию можно и без обращения к диаграммам Фейнмана. Однако мы уклонились от темы.

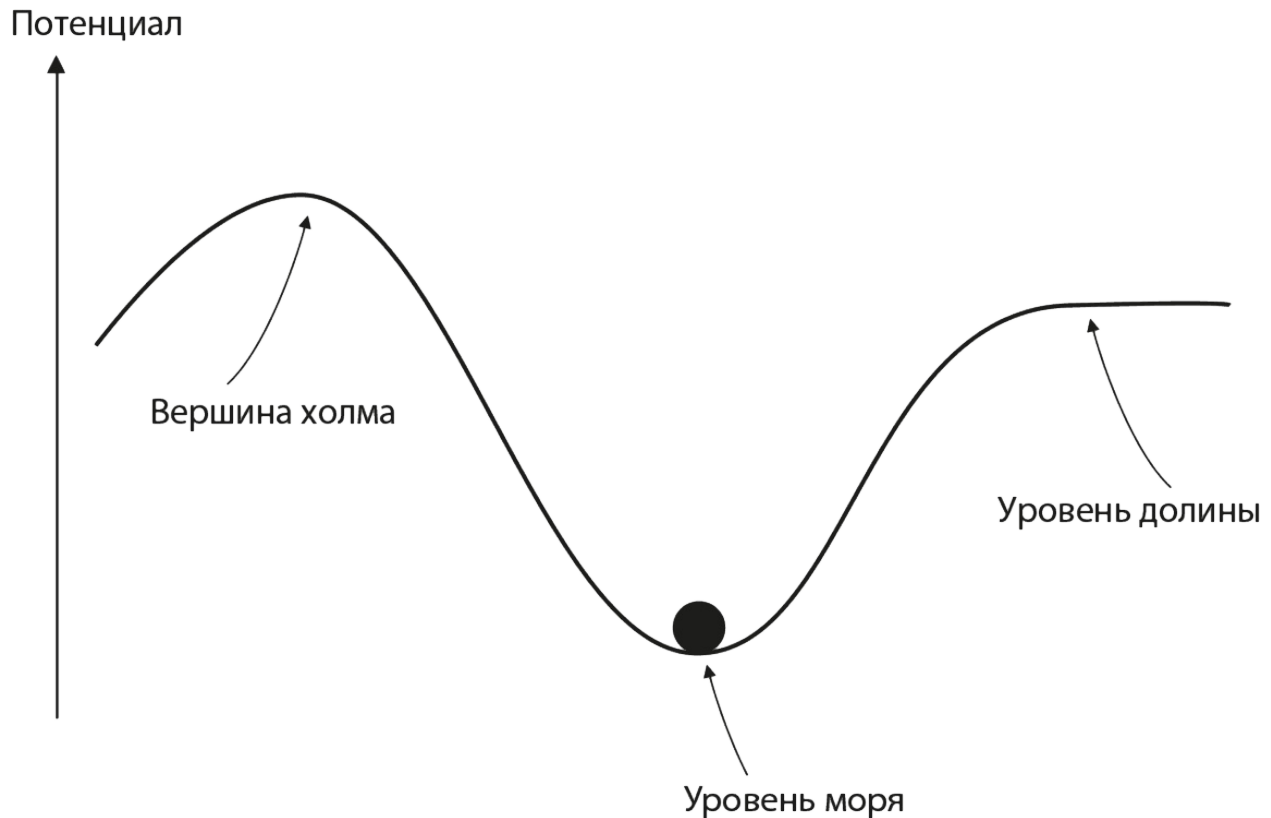


Рис. 6.4. Мяч лежит в долине. Высота над уровнем моря прямо пропорциональна потенциалу, воздействию которого подвергается движущаяся частица

Этот пример очень важен, потому что в прямом смысле демонстрирует форму потенциала^[23].

Однако идея имеет более общее содержание и работает в том числе и для потенциалов, созданных не гравитацией и не впадинами на земной поверхности. Примером служит электрон, оказавшийся в прямоугольной яме. В отличие от случая с мячом в долине, высота стенок ящика не может быть точной высотой чего бы то ни было; скорее, можно говорить, что она соответствует скорости, с которой должен двигаться электрон, чтобы выбраться из ямы. В случае с долиной аналогом этого будет быстрое движение мяча, при котором он взлетит выше стен и выскочит из ямы. Если

электрон движется достаточно медленно, точная высота потенциала не имеет особого значения, и можно уверенно предположить, что движение электрона ограничено внутренней частью ямы.

Теперь сосредоточимся на электроне, замкнутом в ящике, который описывается прямоугольной потенциальной ямой. Поскольку он не может вырваться из ящика, квантовые волны должны упасть до нуля у его стенок. Три возможные квантовые волны с наибольшими длинами будут полностью аналогичны волнам, созданным гитарной струной и показанным на рис. 6.2: самая длинная волна будет иметь двойной размер по сравнению с ящиком, то есть $2L$; следующая по длине волна будет равна размеру ящика – L ; а следующая – $2L / 3$. В общем случае мы можем описать электронные волны формулой $2L / n$, где $n = 1, 2, 3, 4$ и т. д.

Таким образом, для нашего прямоугольного ящика электронные волны будут иметь точно такую же форму, что и волны на гитарной струне: это будут волны-синусоиды с четко определенным набором разрешенных длин. Теперь можно двинуться вперед, призвав на помощь уравнение де Бройля из предыдущей главы и связав длину этих волн-синусоид с импульсом электрона: $p = h / \lambda$. В этом случае стоячие волны описывают электрон, которому разрешено иметь лишь определенные импульсы, заданные формулой $p = nh / (2L)$, где все, что нам остается, – подставить разрешенные длины волны в уравнение де Бройля.

Получается, что импульс нашего электрона в прямоугольной яме квантуется. Это уже большое достижение. Однако надо быть осторожными: потенциал на рис. 6.3 – специфический случай, для других потенциалов стоячие волны обычно не синусоидальные. На рис. 6.5 показана фотография стоячих волн, созданных барабаном. Кожа барабана усыпана песком, который собирается в узлах стоячей волны. Так как кайма вибрирующего барабана круглая, а не прямоугольная, стоячие волны уже не будут синусоидами^[24]. Это значит, что в более реалистичной ситуации, когда электрон пойман протоном, стоячие волны тоже не будут синусоидами. В свою очередь, это подразумевает, что связь между длиной волны и импульсом утеряна. И как в этом случае интерпретировать стоячие волны? Что если у пойманных частиц квантуется не импульс?



Рис. 6.5. Вибрирующий барабан покрыт песком. Песок собирается в узлах стоячих волн

Мы можем найти ответ, если заметим, что в прямоугольной потенциальной яме квантуется не только импульс электрона, но и его энергия. Это простое наблюдение, кажется, не содержит никакой новой важной информации, поскольку энергия и импульс прямо связаны друг с другом, а именно энергия $E = p^2 / 2m$, где p – импульс удерживаемого электрона, а m – его масса^[25]. Но это наблюдение не такое уж бесполезное, как можно подумать, потому что для потенциалов не столь простых, как прямоугольная яма, каждая стоячая волна *всегда* соотносится с частицей определенной энергии.

Важное различие между энергией и импульсом появляется потому, что уравнение $E = p^2 / 2m$ верно, только если потенциал одинаков по всей области вероятного пребывания частицы и позволяет ей двигаться свободно, как по мраморной столешнице или, что больше относится к делу, как электрону в прямоугольной яме. В общем случае энергия частицы не будет сводиться к $E = p^2 / 2m$; это будет сумма кинетической и потенциальной энергий частицы. Так разрушается прямая связь между энергией частицы и ее импульсом.

Можно еще раз проиллюстрировать это положение с помощью мяча в долине с рис. 6.4. Начнем с мяча, который счастливо покоится на дне. С ним ничего не происходит^[26]. Чтобы заставить мяч катиться вверх по склону, его нужно ударить, то есть добавить ему энергии. В мгновение, следующее за ударом, вся его энергия будет кинетической. По мере подъема мяча по склону он будет замедляться, пока на какой-то высоте не остановится, после чего будет снова падать. В момент остановки он

не будет обладать кинетической энергией, но ведь энергия не исчезла по волшебству. На самом деле вся кинетическая энергия превратилась в потенциальную, которая равняется mgh , где g – ускорение свободного падения у поверхности Земли, а h – высота мяча над земной поверхностью. Когда мяч начинает падать, эта накопленная потенциальная энергия при наборе скорости постепенно снова превращается в кинетическую. Итак, пока мяч перелетает с одного конца долины в другой, общая энергия остается постоянной, но периодически перетекает из кинетической в потенциальную. Разумеется, импульс мяча постоянно меняется, но суммарная энергия остается неизменной (предположим, что трения, замедляющего скорость мяча, не существует. Если бы мы включили его в нашу картину, общая энергия тоже осталась бы неизменной, но нужно было бы добавить в качестве ее составляющей энергию, идущую на трение).

Сейчас мы попытаемся исследовать связь между стоячими волнами и частицами определенной энергии иным способом, не обращаясь к особому случаю прямоугольной ямы. Воспользуемся на сей раз маленькими квантовыми циферблатами.

В первую очередь заметьте: если электрон в какой-то момент времени описывается стоячей волной, то он будет описываться той же стоячей волной и в любой следующий момент. Под «той же» мы подразумеваем неизменность формы волны, как в случае со стоячей водяной волной на рис. 6.1. Мы, конечно, не имеем в виду, что волна вообще не меняется: изменяется ее высота, но не положение пиков и узлов.

Это позволяет нам установить, как должно выглядеть описание стоячей волны в терминах квантовых циферблатов, и оно показано на рис. 6.6 для случая стоячей волны основного тона. Размеры циферблатов вдоль волны отражают положение пиков и узлов, а все стрелки часов движутся с одинаковой скоростью. Надеемся, вы понимаете, почему мы изобразили именно такую группу циферблатов. Узлы должны всегда быть узлами, а пики – пиками, и они все должны оставаться на одном месте. Это значит, что циферблаты вблизи узлов должны *всегда* быть очень маленькими, а циферблаты, соответствующие пикам, должны *всегда* иметь самые длинные стрелки. Таким образом, единственное, что мы вольны делать, – так это поместить циферблаты по своему усмотрению и заставить их стрелки вращаться синхронно. Если следовать методологии предыдущих глав, мы должны были бы начать с конфигурации циферблатов, показанной в верхнем ряду рис. 6.6, и использовать правила уменьшения и поворота стрелок, чтобы получить три нижних ряда позже.

Это упражнение со скачущими циферблатами – слишком сильный скачок прочь от темы книги, но его можно выполнить, и тут есть неплохой поворот^[27], поскольку, чтобы выполнить упражнение правильно, нужно учесть тот факт, что частица «отскакивает от стенок ящика», прежде чем двинуться в своем направлении. Кстати, поскольку циферблаты в центре больше, мы можем непосредственно заключить, что электрон, который описывается этим набором циферблатов, скорее окажется в центре ящика, чем по краям.

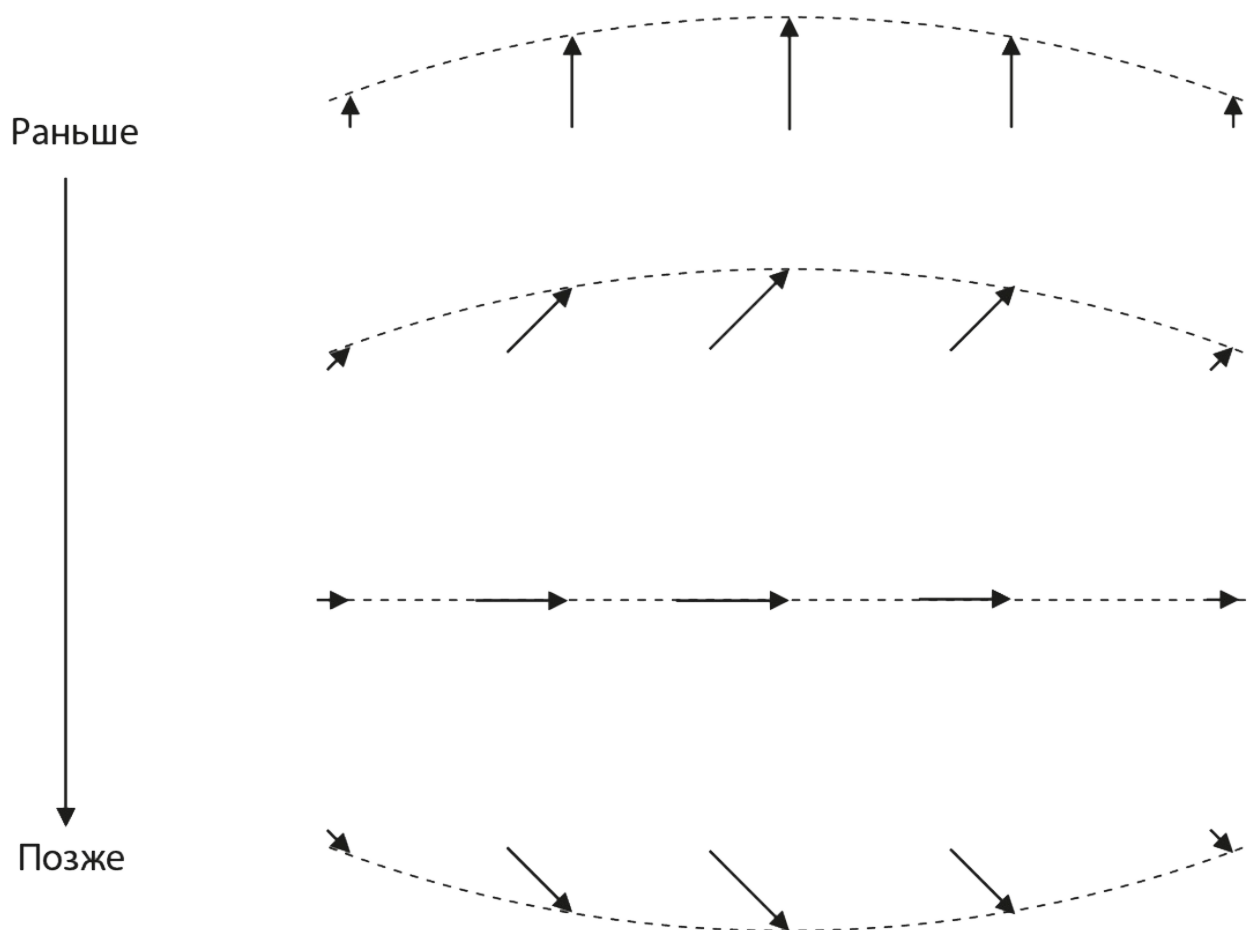


Рис. 6.6. Четыре снимка стоячей волны в последовательные моменты времени. Стрелки на рисунке соответствуют стрелкам часов, а пунктирная линия – проекции «двенадцатичасового» направления. Все стрелки движутся в унисон

Итак, мы выяснили, что удерживаемый электрон описывается набором циферблатов, все стрелки которых вращаются с одинаковой скоростью. Физики, впрочем, обычно так не говорят, а уж музыканты и подавно; те и другие говорят, что стоячие волны – это волны определенной

частоты^[28]. Высокочастотные волны соответствуют часам, стрелки которых вращаются быстрее, чем стрелки часов низкочастотных волн. Это понятно, потому что если стрелка часов вращается быстрее, то уменьшается время падения волны с максимума до минимума и обратного подъема (представленного полным оборотом стрелки). Если говорить о водяных волнах, то высокочастотные стоячие волны поднимаются и опускаются быстрее, чем низкочастотные. В музыке говорят, что среднее до имеет частоту 262 Гц, то есть гитарная струна ежесекундно колеблется 262 раза. Нота ля выше среднего до, она имеет частоту 440 Гц, то есть колеблется быстрее (это общепринятый стандарт настройки в большинстве оркестров и для музыкальных инструментов во всем мире). Как мы уже отметили, однако, лишь для чистых синусоид верно, что волны определенной частоты имеют и определенную длину волны. В общем же случае частота – фундаментальная величина, которая описывает стоячие волны, но это определение, кажется, ничего не определяет. Вот вопрос на миллион долларов: что такое электрон определенной частоты? Напомним, что состояния электрона нам интересны, потому что они квантованы, и еще потому, что электрон в одном подобном состоянии остается таким все время (пока нечто не войдет в область потенциала, воздействуя на этот электрон).

Последнее предложение намекает, что мы должны понять значение частоты. В этой главе мы уже встречались с законом сохранения энергии, и это один из самых несомненных законов физики. Сохранение энергии означает, что если электрон в атоме водорода (или в прямоугольной яме) обладает определенной энергией, то эта энергия *не может* измениться, пока «что-то не произойдет». Иными словами, электрон не может спонтанно изменить свою энергию без какой-либо причины. Кажется, что это не очень интересно, но сравните это со случаем, когда известно, что электрон находится в определенной точке. Как мы все хорошо знаем, он теперь будет перемещаться по всей Вселенной в долю секунды, переводя бесконечное число циферблатов. Но поведение циферблатов для стоячей волны будет иным. Структура циферблатов сохранит свою форму, и все стрелки будут счастливо вращаться, пока что-либо не нарушит их хода. Неизменная природа стоячих волн, таким образом, делает их очевидным кандидатом на описание электрона с определенной энергией.

Сделав шаг, связывающий частоту стоячей волны с энергией частицы, теперь мы можем использовать наше представление о гитарных струнах и предположить, что более высокие частоты должны соответствовать большим энергиям. Дело в том, что высокая частота подразумевает

меньшую длину волны (поскольку короткие струны вибрируют быстрее), и мы, изучив конкретный случай прямоугольной потенциальной ямы, можем ожидать, что более короткая длина волны соответствует частице с большей энергией – по уравнению де Бройля. Таким образом, можно сделать важный вывод, который необходимо запомнить: *стоячие волны описывают частицы с определенной энергией, и чем больше энергия, тем быстрее идут стрелки часов.*

Резюмируем: если электрон удерживается потенциалом, то его энергия квантуется. На физическом жаргоне это звучит так: удерживаемый электрон может существовать только на определенных «энергетических уровнях». Минимально возможная энергия электрона соответствует его описанию только одной стоячей волной «основного тона»^[29], и этот энергетический уровень обычно называют *основным состоянием*. Энергетические уровни, соответствующие стоячим волнам с более высокими частотами, носят название *возбужденных состояний*.

Представим электрон с определенной энергией, удерживаемый в прямоугольной потенциальной яме. Мы говорим, что он «находится на определенном энергетическом уровне» и его квантовая волна связана с единственным значением n . Выражение «находится на определенном энергетическом уровне» отражает тот факт, что электрон в отсутствие любых внешних влияний не делает ничего. Обобщим: электрон можно описать сразу многими стоячими волнами, как звук гитары состоит из многих гармоник. Это значит, что в общем случае электрон не имеет конкретной энергии.

Важно, что при измерении энергии электрона всегда будет получаться величина, равная той, которая связана с одной из составляющих стоячих волн. Чтобы вычислить вероятность нахождения электрона с конкретной энергией, мы должны взять циферблаты, связанные с конкретной составляющей общей волновой функции, возвести их в квадрат и сложить. От получившегося числа и зависит вероятность нахождения электрона в этом конкретном энергетическом состоянии. Сумму всех таких вероятностей (одна для каждой составляющей стоячей волны) должна в итоге получиться равной единице, и это лучшая иллюстрация того, что энергия частицы всегда будет соответствовать конкретной стоячей волне.

Сразу скажем, что электрон может одновременно иметь несколько различных энергий, и это утверждение ничуть не менее странное, чем то, что он имеет множество положений. Конечно, дочитав книгу до этого момента, стресс вы вряд ли испытаете, но для нашего повседневного

восприятия это все равно шок. Заметьте, что есть критически важная разница между удерживаемой квантовой частицей и стоячими волнами в бассейне или на гитарной струне. Идея квантования волны на гитарной струне вовсе не странна, потому что волна, которая, собственно, описывает вибрирующую струну, одновременно состоит из многих разных стоячих волн, и все они физически составляют общую энергию волны. Так как смешивать их можно любым образом, действительная энергия вибрирующей струны может принимать вообще любое значение. Однако для электрона, запертого внутри атома, относительный вклад каждой стоячей волны описывает вероятность того, что электрон будет обнаружен с некой конкретной энергией.

Важная разница в том, что водяные волны – это волны водяных молекул, а электронные волны – это определенно не волны электронов.

Все это показывает, что энергия электрона внутри атома квантуется. Это значит, что электрон просто не может иметь энергию, значение которой будет располагаться между определенными разрешенными величинами: примерно как если бы мы сказали, что машина может ехать со скоростью 10 или 40 км/ч, но не с какой-то скоростью между этими двумя величинами. И это фантастически странное умозаключение непосредственно объясняет, почему атомы не испускают свет постоянно, что сопровождалось бы спиральным движением электрона к ядру. Дело в том, что электрон не может постоянно, по чуть-чуть излучать энергию. Единственный способ, которым он может испускать энергию, – потерять ее сразу и полностью.

То, что мы уже усвоили, можно применить к наблюдаемым свойствам атомов, а именно к уникальному цвету их излучения. На рис. 6.7 показан видимый свет, испускаемый простейшим атомом – водородом. Свет состоит из пяти отчетливых цветов: ярко-красная линия соответствует свету с длиной волны 656 нм, светло-голубая – длине волны 486 нм, а три остальные фиолетовые затухают в ультрафиолетовой части спектра. Эта серия цветных линий известна как серия Бальмера (в честь швейцарского физика и математика Иоганна Бальмера, который в 1885 году предложил формулу для ее описания).

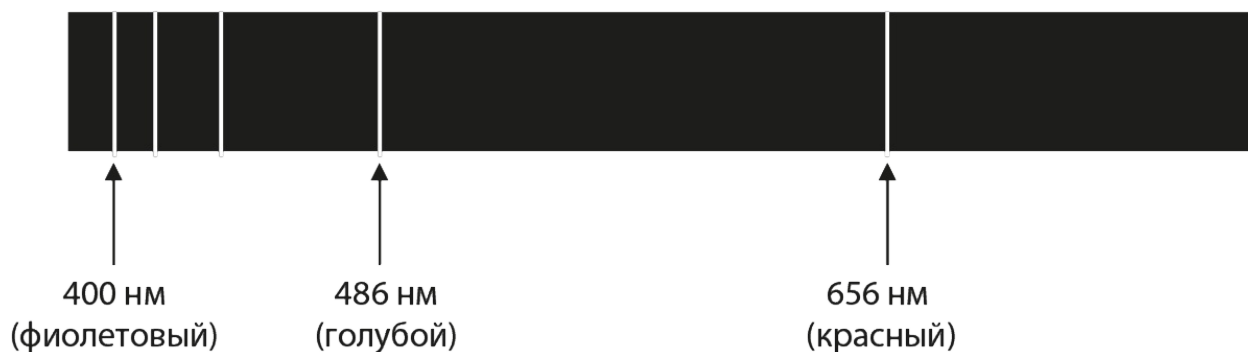


Рис. 6.7. Водородная серия Бальмера: вот что видно, когда свет, испускаемый газообразным водородом, проходит через спектроскоп

Бальмер понятия не имел, почему его формула верна, потому что квантовая теория еще не была открыта: он просто выразил регулярность серии удобной математической формулой. Но мы можем пойти дальше и показать, что все дело в разрешенных квантовых волнах внутри атома водорода.

Мы знаем, что свет можно представить в виде потока фотонов, каждый из которых обладает энергией $E = hc / \lambda$, где λ – длина световой волны^[30]. Таким образом, то, что атомы испускают свет лишь определенного цвета, означает, что они испускают фотоны с четко определенной энергией. Мы выяснили также, что электрон, «заключенный в атоме», может обладать лишь определенной конкретной энергией. Это небольшой шаг на пути к объяснению давней загадки цвета излучения атомов: разные цвета соответствуют испусканию фотонов, при котором электроны «перепрыгивают» с одного разрешенного энергетического уровня на другой. Эта идея подразумевает, что наблюдаемая энергия фотона всегда должна соответствовать разнице между парой разрешенных значений энергии электрона. Такой способ описания физических явлений отлично иллюстрирует ценность выражения состояния электрона в терминах разрешенных значений его энергии. Если вместо этого мы бы предпочли говорить о разрешенных значениях импульса электрона, то квантовая природа этих явлений не была бы столь очевидной и нам не удалось бы с такой легкостью заключить, что атом может испускать и поглощать излучение только с определенными длинами волны.

Модель атома как частицы в ящике недостаточно точна для того, чтобы позволить нам вычислить значения энергии электрона в реальном атоме, необходимые для проверки всей нашей идеи. Но можно провести достаточно точные вычисления, если мы лучше смоделируем потенциал вблизи протона, который и удерживает электрон. Достаточно сказать,

что эти вычисления без тени сомнения подтверждают: здесь-то и кроется причина появления загадочных спектральных линий.

Наверное, вы заметили, что мы пока не объяснили, почему электрон, испуская фотон, теряет энергию. Для целей, обсуждающихся в этой главе, такое объяснение не требуется. Но что-то должно побудить электрон покинуть святилище стоячей волны, и это «что-то» будет темой главы 10. Сейчас же просто скажем: чтобы объяснить наблюдаемые спектры светового излучения, испускаемого атомами, необходимо предположить, что свет испускается, когда электрон перескакивает с одного энергетического уровня на другой, с меньшей энергией. Разрешенные энергетические уровни определяются формой удерживающего ящика и варьируются от атома к атому, потому что разные атомы служат разной средой, внутри которой заключены их электроны.

До настоящего времени мы сполна использовали возможности для объяснения положения дел с помощью очень простой картины атома, но вообще-то не так уж верно считать, что электроны свободно передвигаются внутри какого-то ящика, который их ограничивает. Они передвигаются вблизи множества протонов и других электронов, и для лучшего понимания природы атомов мы должны определить, как более точно описать эту среду.

Атомный ящик

Вооружившись понятием потенциала, можно более точно описать атомы. Начнем с простейшего из всех – атома водорода. Он состоит всего из двух частиц – электрона и протона. Протон почти в 2000 раз тяжелее электрона, так что мы можем предположить, что он почти ничего не делает и просто покоится на месте, создавая потенциал, удерживающий электрон.

Протон обладает положительным электрическим зарядом, а электрон – равным ему отрицательным зарядом. Кстати, причина, по которой электрические заряды протона и электрона *в точности* равны и противоположны друг другу, – это одна из величайших загадок физики. Вероятно, есть очень веская причина, которая связана с некоей пока еще не открытой теорией субатомных частиц, но на момент написания этой книги никто не может сказать этого с уверенностью.

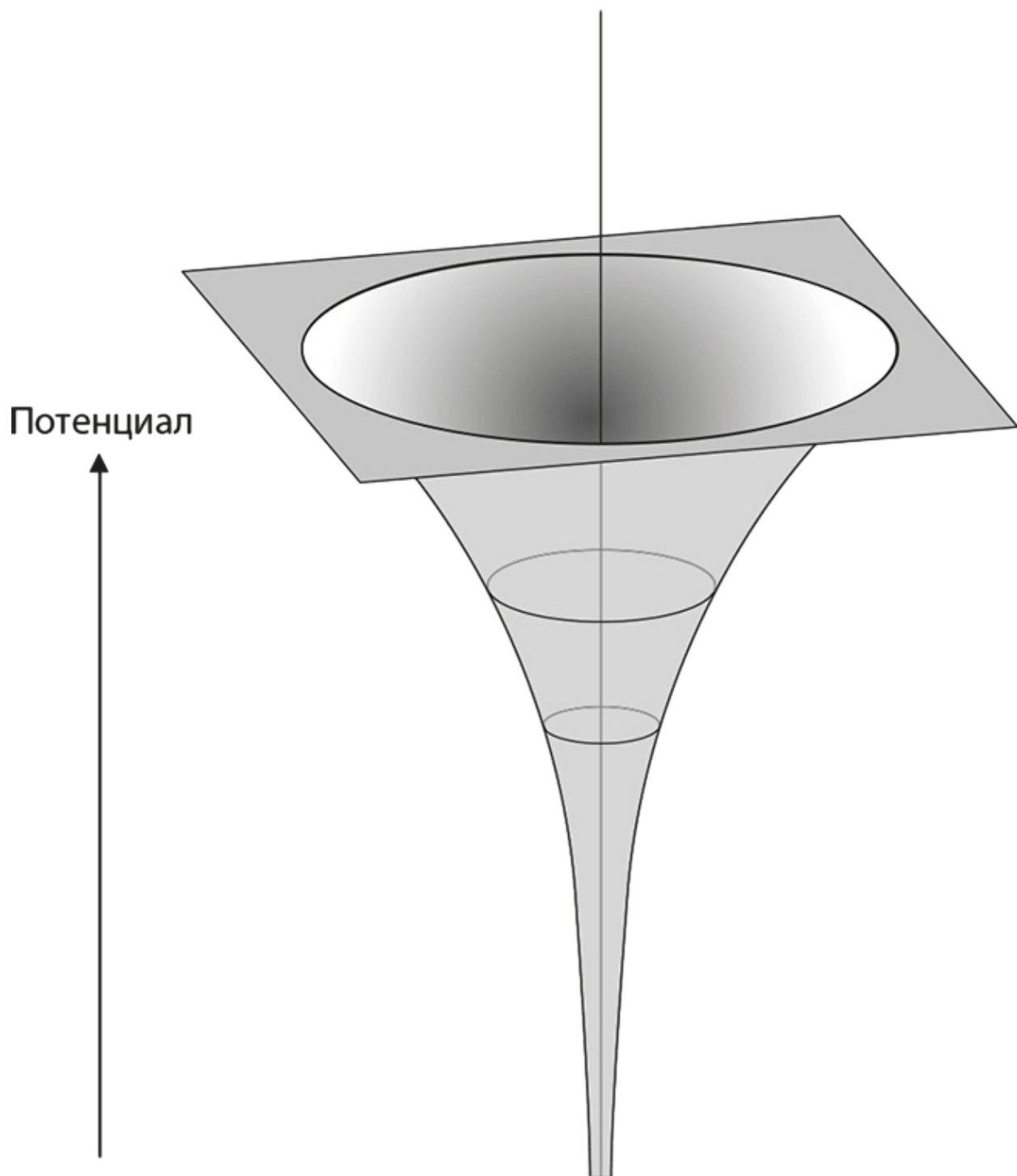


Рис. 6.8. Потенциальная яма Кулона вокруг протона. Яма глубже всего там, где находится сам протон

Что мы действительно знаем, так это то, что противоположные заряды притягиваются и протон перетягивает электрон к себе, поэтому, с точки зрения доквантовой физики, он может притянуть к себе электроны на сколь

удобно малое расстояние. Насколько оно мало, зависит от конкретной природы протона: он твердый шарик или какое-то облако? Но этот вопрос не имеет физического смысла, потому что, как мы уже видели, существует минимальный энергетический уровень, на котором может находиться электрон и который определяется (грубо говоря) квантовой волной самой большой длины, которая способна поместиться в потенциал, созданный протоном. Этот созданный протоном потенциал мы изобразили на рис. 6.8. Глубокая «яма» функционирует так же, как уже известная нам прямоугольная потенциальная яма, только ее форма уже не столь проста. Она носит название потенциала Кулона, потому что подчиняется закону, описывающему взаимодействие двух электрических зарядов, который впервые вывел Шарль Огюстен де Кулон в 1783 году.

Проблема, однако, остается той же самой: мы должны выяснить, какие квантовые волны могут соответствовать этому потенциалу, что и определит разрешенные энергетические уровни атома водорода. Будучи бесхитростными, мы могли бы сказать, что это делается посредством «решения волнового уравнения Шрёдингера для потенциальной ямы Кулона», что служит способом применения правила перевода циферблатов. Детали этого процесса чисто технические, даже для таких простых объектов, как атом водорода. К счастью, мы не узнаем здесь почти ничего нового по сравнению с тем, что уже усвоили, так что перейдем прямо к ответу. Рис. 6.9 показывает некоторые получающиеся стоячие волны для электрона в атоме водорода. Это картина распределения вероятностей нахождения электрона в какой-либо точке. В более светлых областях такая вероятность выше. Конечно, реальный атом водорода трехмерный, и эти рисунки соответствуют разрезам в центре атома. Рисунок слева вверху – это волновая функция основного состояния, показывающая, что электрон в этом случае обычно находится на расстоянии примерно 1×10^{-10} м от протона. Энергия стоячих волн нарастает от левого верхнего к правому нижнему рисунку. Масштаб тоже изменяется в восемь раз от левого верхнего к правому нижнему рисунку, так что светлая область, покрывающая большую часть левого верхнего рисунка, имеет примерно тот же размер, что и маленькие яркие точки в центре двух правых рисунков. Это значит, что электрон, скорее всего, будет располагаться дальше от протона, когда он находится на более высоких энергетических уровнях (а следовательно, слабее с ним связан). Ясно, что эти волны совсем не синусоиды, то есть не соотносятся с состояниями определенного импульса. Но, как мы из всех сил стараемся подчеркнуть, они соответствуют состояниям определенной энергии.

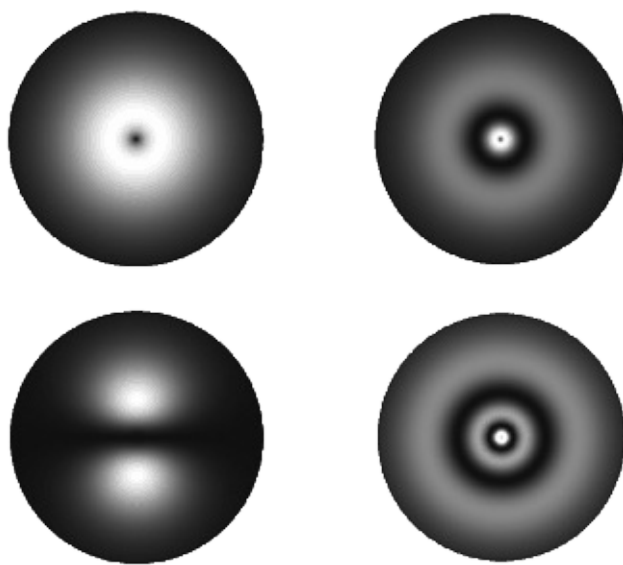


Рис. 6.9. Четыре квантовые волны с самой низкой энергией, описывающие электрон в атоме водорода. В светлых областях электрон может находиться с наибольшей вероятностью. Протон в центре. Рисунки сверху справа и внизу слева увеличены в 4 раза по сравнению с первым, а рисунок внизу справа – в 8 раз. Первый рисунок соответствует размеру примерно 3×10^{-10} м в диаметре

Отчетливая форма стоячих волн появляется благодаря форме ямы, однако некоторые детали следует обсудить более подробно. Самая очевидная особенность воронки вокруг протона заключается в ее сферической симметрии, то есть со всех сторон она выглядит одинаково. Чтобы представить это, возьмите баскетбольный мяч без каких-либо отметок на нем: это идеальная сфера, которая выглядит одинаково, как ее ни вращай. Возможно, мы можем думать об электроны внутри атома водорода как о запертом внутри микроскопического баскетбольного мяча? Это определенно более удачно, чем говорить о том, что электрон попался в квадратную яму, но, как ни удивительно, тут есть некое сходство. Рис. 6.10 показывает слева две стоячие волны с самой низкой энергией, которые могут возникнуть внутри баскетбольного мяча. Мы снова разрезали мяч, и давление воздуха внутри него повышается от черного к белому. Справа даны две возможные стоячие волны электрона в атоме водорода.

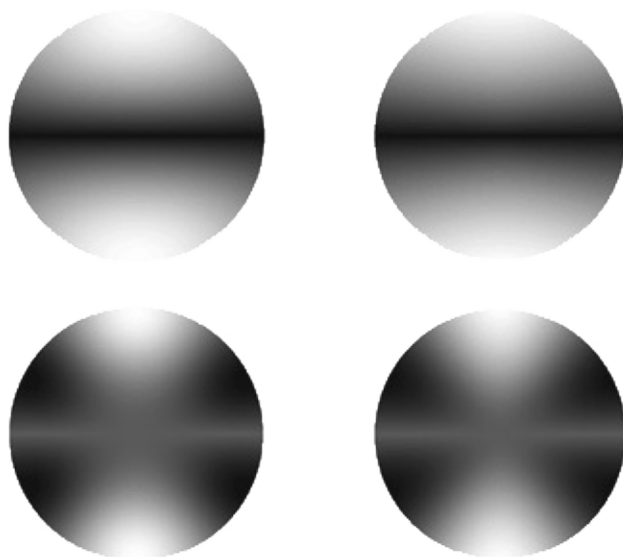


Рис. 6.10. Две простейшие стоячие звуковые волны внутри баскетбольного мяча (слева) в сравнении с соответствующими электронными волнами в атоме водорода (справа). Они очень похожи. Верхний рисунок атома водорода – это увеличенное изображение центральной части левой нижней картинки с рис. 6.9

Рисунки не идентичны, но очень похожи. И снова не будет столь уж глупо предположить, что электрон внутри атома водорода находится внутри чего-то, похожего на микроскопический баскетбольный мяч. Этот рисунок демонстрирует волновое поведение квантовых частиц, и мы надеемся, что он до некоторой степени срывает покровы таинственности с данного предмета: понимание поведения электрона в атоме водорода не более сложно, чем понимание того, как колеблется воздух внутри баскетбольного мяча.

Прежде чем оставить в покое атом водорода, мы хотели бы еще немного поговорить о потенциале, создаваемом протоном, и о том, как электрон перепрыгивает с более высокого энергетического уровня на более низкий, испуская при этом фотон.

Мы избежали разговоров о том, как взаимодействуют друг с другом протон и электрон, введя идею потенциала. Это упрощение позволило понять квантование энергии запертых частиц. Но если мы всерьез хотим понять, что происходит, нужно попытаться объяснить механизм «запираания» частиц. Когда частица движется в рассматриваемом нами ящике, можно представить непроницаемую стенку, предположительно состоящую из атомов, так что частица не может пройти сквозь нее из-за взаимодействия с этими атомами. Правильное понимание

«непроницаемости» приходит через понимание того, как частицы взаимодействуют друг с другом. Мы говорили, что протон в атоме водорода создает потенциал, в котором движется электрон, и этот потенциал захватывает электрон аналогично тому, как частица удерживается в ящике. Это приводит к более глубокой проблеме, потому что электрон, очевидно, взаимодействует с протоном, и именно это предопределяет «запирание» электрона.

В главе 10 мы увидим, что же необходимо добавить к уже сформулированным квантовым правилам. Эти добавки будут касаться взаимодействия частиц. Пока наши правила очень просты: частицы двигаются, перенося с собой воображаемые часы, стрелки которых переводятся назад точно определенным образом в зависимости от расстояния, на которое перемещаются частицы. Все прыжки частиц разрешены, так что частица может переместиться из точки *A* в точку *B* по бесконечному количеству различных траекторий. Каждая траектория приносит в точку *B* собственный квантовый циферблат, и мы должны сложить их все, чтобы получился единый общий циферблат, который позволит нам определить вероятность нахождения частицы в точке *B*. Добавление взаимодействий в эту картину оказывается на удивление простым делом. Мы дополняем правила перемещения частиц новым правилом, которое гласит, что частица может испускать или поглощать другую частицу. Если до взаимодействия была одна частица, то после него их может оказаться две; если до взаимодействия частиц было две, после него может остаться только одна. Конечно, если мы собираемся вырабатывать математические формулы для этого, мы обязаны уточнить, какие именно частицы будут сливаться или распадаться и что произойдет после взаимодействия с теми циферблатами, которые несет с собой каждая частица. Это станет темой главы 10, но предпосылки очевидны и так. Если есть правило, по которому электрон в ходе взаимодействия испускает фотон, то существует вероятность того, что электрон в атоме водорода может испустить фотон, потерять энергию и опуститься на более низкий энергетический уровень. Он может также поглотить фотон, приобрести энергию и подняться на более высокий энергетический уровень.

Существование спектральных линий подтверждает, что именно так все и происходит, но далеко не с равной вероятностью, а именно: электрон может испускать фотон и лишаться энергии в любое время, но единственный способ получения энергии и перехода на более высокий энергетический уровень заключается в существовании фотона (или какого-то иного источника энергии), который мог бы с ним столкнуться.

В газообразном водороде таких фотонов обычно мало, а расстояние между ними велико. Атом в возбужденном состоянии имеет гораздо больше шансов на испускание фотона, чем на его поглощение. Общий эффект состоит в том, что атомы водорода стремятся выходить из возбужденного состояния (релаксировать), под чем мы понимаем победу испускания над поглощением. Со временем атом возвращается к основному состоянию $n = 1$. Это правило не может быть общим, поскольку можно постоянно возбуждать атомы, обеспечив контролируемую подкачку энергии. На этом основана технология лазера, ныне используемая повсеместно. Главная идея лазера состоит в закачивании энергии в атомы, приводящем к их возбуждению, и сборе фотонов, испускаемых при потере электронами энергии. Эти фотоны очень полезны для чтения данных высокой четкости, записанных на поверхности CD или DVD: влияние квантовой механики на нашу жизнь весьма многообразно.

В этой главе мы сумели объяснить происхождение спектральных линий, используя простую идею квантованных энергетических уровней. Кажется, нам удалось выработать правильный взгляд на атомы. Но все же кое-что не совсем так. Не хватает последнего кусочка головоломки, без которого невозможно объяснить структуру более тяжелых атомов, чем водород. Если говорить более прозаично, нам также не удастся объяснить, почему мы, собственно, не проваливаемся сквозь землю, что создает проблемы для нашей замечательной теории природы. Объяснение, которое мы ищем, кроется в работах австрийского физика Вольфганга Паули.

7. Вселенная на булавочной головке (и почему мы не проваливаемся сквозь землю)

То, что мы не проваливаемся сквозь землю, само по себе несколько удивительно. Объяснять это тем, что земля твердая, не особенно эффективно, во многом благодаря открытию Резерфорда, что атомы – это почти полностью пустое пространство. Ситуация удивляет еще больше, потому что, насколько мы знаем, фундаментальные частицы природы размером не обладают вовсе. Иметь дело с частицами, «не имеющими размера», явно проблематично и, вероятно, даже невозможно. Но ничто из сказанного в предыдущих главах не предполагает и не требует от частиц физической протяженности. Понимание их как действительно точечных объектов необязательно неверно, даже если бросает вызов здравому смыслу – если у читателя остался хоть какой-то здравый смысл на этой стадии книги о квантовой теории. Конечно, весьма возможно, что будущие эксперименты, например на Большом адронном коллайдере, покажут, что электроны и кварки вовсе не истинно элементарные частицы, но нынешние эксперименты этого не подтверждают, поэтому в фундаментальных уравнениях физики частиц нет места для их «размера». Нельзя сказать, что с точечными частицами не возникает проблем – идея конечного заряда, зажатого в бесконечно малый объем, довольно трудна для понимания, – но все же удастся каким-то образом обойти теоретические трудности. Похоже, что развитие квантовой теории гравитации – основная проблема фундаментальной физики – намекает на конечный размер, но свидетельств пока попросту недостаточно, чтобы физики отказались от столь любимой идеи элементарных частиц. Подчеркнем еще раз: точечные частицы не имеют размера, поэтому вопрос «Что случится, если я расщеплю электрон надвое?» не имеет никакого смысла – половинки электрона не бывает.

Приятный бонус работы с элементарными фрагментами материи, не имеющими никакого размера, состоит в том, что мы без проблем можем представить, что вся видимая Вселенная когда-то была сжата в объект размером с грейпфрут или даже с булавочную головку. Как бы ни шла кругом голова от таких мыслей – трудно вообразить, как до размеров горошины сжимается гора, не говоря уже о звезде, галактике и тем более

350 миллиардах больших галактик в обозримой Вселенной, – нет никаких причин объявлять такое сжатие невозможным. И действительно, современные теории происхождения Вселенной непосредственно оперируют свойствами, которые она имела в подобном астрономически плотном состоянии. Такие теории на первый взгляд кажутся нелепыми, но имеют ряд подтверждающих свидетельств. В последней главе нам встретятся объекты с плотностью если не как у «Вселенной в булавочной головке», то точно как у «горы в горошине»: белые карлики – объекты с массой звезды и объемом Земли – и нейтронные звезды, имеющие схожую массу и сжатые в идеальные шары размером с крупный город. И это не объекты из научной фантастики; астрономы наблюдают их и проводят точнейшие измерения, а квантовая теория позволяет вычислить их свойства и сравнить с данными наблюдений. Первый шаг на пути к пониманию белых карликов и нейтронных звезд состоит в том, чтобы обратиться к гораздо более прозаичному вопросу, с которого мы и начали эту главу: если Земля – по большей части пустое пространство, то почему мы сквозь нее не проваливаемся?

У этого вопроса длительная и почтенная история, и ответ на него не был сформулирован удивительно долго: он появился лишь в 1967 году в статье Фримена Дайсона и Эндрю Ленарда. Они принялись за дело, потому что некий физик пообещал бутылку винтажного шампанского тому, кто сможет доказать, что материя не может сжаться сама по себе. Дайсон говорил, что доказательство было исключительно сложным и туманным, но они показали, что материя способна быть стабильной, только если электроны будут подчиняться так называемому принципу Паули – одному из самых удивительных явлений в нашей квантовой Вселенной.

Начнем с цифр. В прошлой главе мы видели, что структуру простейшего атома водорода можно понять, найдя разрешенные квантовые волны, которые помещаются внутри потенциальной ямы протона. Это позволило разобраться, по крайней мере, с количественной точки зрения, почему атомы водорода испускают свет именно в таком диапазоне. Будь у нас время, мы могли бы вычислить и энергетические уровни в атоме водорода. Любой студент-физик в какой-то момент обучения проводит эти вычисления, и они прекрасно сходятся с экспериментальными данными. Кстати, о предыдущей главе: упрощение «частица в ящике» было довольно удачным, поскольку содержало все критические моменты, которые мы хотели подчеркнуть. Однако теперь нам понадобятся еще более точные вычисления, учитывающие, что реальный атом водорода существует в трех измерениях. Для нашей частицы в ящике мы рассматривали только одно

измерение и получили серию энергетических уровней, помеченных числом n . Низший энергетический уровень был назван $n = 1$, следующий – $n = 2$ и т. д. Когда расчеты распространяются на случай для трех измерений, оказывается (что, впрочем, не должно удивлять), что для характеристики всех разрешенных энергетических уровней необходимы три числа. Традиционно они помечаются как n , l и m и называются *квантовыми числами* (в этой главе не следует путать m с массой частицы).

Квантовое число n – это эквивалент числа n для частицы в ящике. Оно принимает целые значения ($n = 1, 2, 3$ и т. д.), а энергия частицы стремится к увеличению с увеличением n . Возможные значения l и m оказываются связаны с n ; l должно быть меньше n и может равняться нулю, например, если $n = 3$, то l может быть 0, 1 или 2; m может принимать любое значение от минус l до плюс l с целочисленными шагами. Так, если $l = 2$, то m может равняться $-2, -1, 0, +1$ или $+2$. Мы не собираемся объяснять, откуда берутся все эти числа, потому что к нашему пониманию предмета это ничего не добавит. Достаточно сказать, что четыре волны на рис. 6.9 имеют $(n, l) = (1, 0), (2, 0), (2, 1)$ и $(3, 0)$ соответственно (для всех этих волн $m = 0$)^[31].

Как мы уже говорили, квантовое число n здесь главное: оно контролирует разрешенные значения энергии для электрона. В небольшой степени разрешенные значения энергии зависят и от значения l , но проявляется это только при очень точных измерениях испускаемого света. Бор не принимал его во внимание, впервые вычисляя энергию спектральных линий водорода, и его исходная формула выражалась исключительно через n . От m энергия электрона совершенно не зависит, пока атом водорода не помещен в магнитное поле (собственно, m и называется *магнитным квантовым числом*), но это не значит, что m не важно. Чтобы понять это, вернемся к нашим числам.

Если $n = 1$, сколько существует возможно разных энергетических уровней? Применив сформулированные выше правила, узнаем, что l и m могут в случае $n = 1$ равняться только нулю, так что энергетический уровень будет лишь 1.

Теперь проведем расчеты для $n = 2$: l может принимать два значения, 0 и 1. Если $l = 1$, то m может равняться $-1, 0$ или $+1$, то есть получается еще 3 энергетических уровня (всего 4).

Для $n = 3$ l может составлять 0, 1 или 2. Для $l = 2$ m может равняться $-2, -1, 0, +1$ или $+2$, что дает 5 уровней. Итак, всего получается $1 + 3 + 5 = 9$ уровней для $n = 3$. И так далее.

Запомните числа для трех первых значений n : 1, 4 и 9. Теперь

посмотрим на рис. 7.1, где показаны первые четыре ряда периодической таблицы химических элементов, и подсчитаем, сколько элементов в каждом ряду. Разделив эти значения на 2, мы получим 1, 4, 4 и 9. Важность этого вскоре выяснится.

Группа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr

Рис. 7.1. Первые четыре ряда периодической таблицы химических элементов

Честь расположения химических элементов подобным образом обычно приписывается русскому химику Дмитрию Менделееву, который представил ее 6 марта 1869 года на заседании Русского химического общества. Это было задолго до того, как придумали вычислять разрешенные энергетические уровни атома водорода. Менделеев расположил элементы в порядке их атомных весов, что на современном языке соответствует количеству протонов и нейтронов внутри атомных ядер, хотя, конечно, в то время он и этого тоже не знал. Расположение элементов на самом деле соответствует числу протонов в ядре (количество нейтронов значения не имеет), но для самых легких элементов эта поправка не имеет значения, благодаря чему Менделеев и сумел расставить их в правильном порядке. Он решил выстроить элементы в ряды и столбцы, отметив, что некоторые элементы обладают очень похожими химическими свойствами, несмотря на разницу атомных весов; вертикальные столбцы как раз и объединяют подобные химические элементы – так, гелий, неон, аргон и криптон в крайнем правом столбце таблицы считаются инертными газами. И Менделеев не только правильно зафиксировал существующее расположение, но и предсказал наличие новых элементов, которые должны были заполнить пробелы в его таблице: элементы 31 и 32 (галлий и германий) были открыты в 1875 и 1886 годах соответственно. Эти открытия подтвердили, что Менделееву удалось нащупать нечто очень важное в строении атомов, но пока никто не знал, что это такое.

Удивительно, что в первом ряду 2 элемента, во втором и третьем их 8,

а в четвертом – 18. Эти числа ровно в два раза больше тех, что получились у нас после подсчета разрешенных энергетических уровней в водороде. Почему?

Как мы уже упоминали, элементы в периодической системе упорядочены слева направо по рядам в соответствии с количеством протонов в ядре, что совпадает с количеством электронов, которые могут содержать эти атомы. Помните, что все атомы электрически нейтральны: положительные электрические заряды протонов точно уравниваются отрицательными зарядами электронов. Здесь явно что-то интересное связано с химическими свойствами элементов и разрешенными энергетическими уровнями, который электроны могут иметь во время вращения по орбитам вокруг ядра.

Мы можем представить, как более тяжелые атомы строятся из более легких, к которым по очереди добавляются протоны, нейтроны и электроны. Нужно держать в уме, что каждый раз при добавлении лишнего протона в ядро мы должны добавить и дополнительный электрон на один из энергетических уровней. Арифметические упражнения помогут создать систему, которую мы видим в периодической таблице, если просто допустить, что каждый энергетический уровень может содержать два и только два электрона. Посмотрим, как это работает.

У водорода только один электрон, который попадает на уровень $n = 1$. У гелия два электрона, которые тоже разместятся на уровне $n = 1$. Теперь уровень $n = 1$ заполнен. Чтобы получить литий, мы должны добавить третий электрон, но он уже пойдет на уровень $n = 2$. Следующие 7 электронов, соответствующие следующим 7 элементам (бериллий, бор, углерод, азот, кислород, фтор и неон), могут тоже уместиться на уровне $n = 2$, потому что там имеются 4 места, соответствующие $l = 0$ и $l = 1$, $m = -1, 0$ и $+1$. Таким образом можно найти место для всех элементов до неона включительно. На неоне уровни $n = 2$ заполняются, и начиная с натрия мы переходим к $n = 3$. Следующие 8 электронов один за другим начинают заполнять уровни $n = 3$; сначала электроны идут на $l = 0$, затем на $l = 1$. Это происходит для всех элементов третьего ряда вплоть до аргона. Четвертый ряд таблицы можно объяснить, если предположить, что он содержит все оставшиеся электроны $n = 3$ (то есть 10 электронов с $l = 2$) и электроны $n = 4$ с $l = 0$ и 1 (всего 8 электронов), так что в итоге и получается волшебное число – 18 электронов. Мы набросали, как электроны заполняют энергетические уровни, для самого тяжелого элемента в нашей таблице – криптона (с его 36 электронами) – на рис. 7.2.

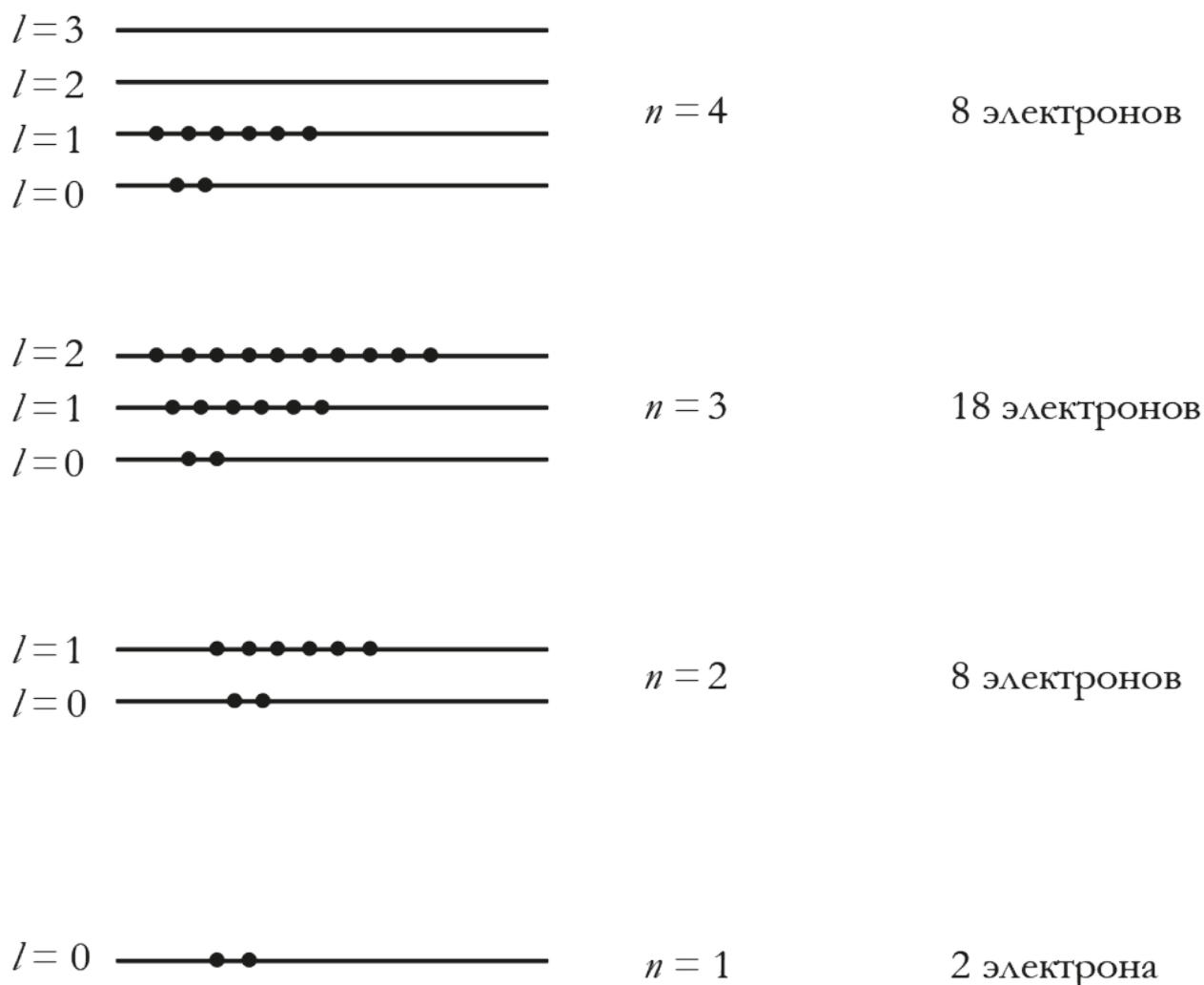


Рис. 7.2. Заполнение энергетических уровней криптона. Точки символизируют электроны, а горизонтальные линии – энергетические уровни, помеченные квантовыми числами n , l и m . Мы сгруппировали уровни с различными значениями m , но одинаковыми значениями n и l

Чтобы изложенное относилось к науке, а не к занимательной математике, предстоит сделать несколько пояснений. Во-первых, нужно объяснить, почему химические свойства элементов из одного и того же вертикального столбца схожи. Из нашей схемы ясно, что первый элемент каждого из трех первых рядов начинает процесс заполнения уровней с увеличивающимся значением n . А именно: водород открывает этот процесс, вводя единственный электрон на пустой до того момента уровень $n = 1$, с лития начинается второй ряд – первый электрон появляется на пустом до того уровне $n = 2$, а с натрия третий ряд – электрон занимает пустой до того уровень $n = 3$. Третий ряд немного выбивается, потому что

на уровне $n = 3$ может находиться 18 электронов, а в самом третьем ряду все же не 18 элементов. Можно предположить, что именно происходит: первые 8 электронов заполняют уровни $n = 3$ с $l = 0$ и $l = 1$, а затем (по каким-то причинам) случается переход на четвертый ряд. Четвертый ряд содержит оставшиеся 10 электронов на уровнях $n = 3$ с $l = 2$ и 8 электронов на уровнях $n = 4$ с $l = 0$ и $l = 1$. То, что ряды не совсем соответствуют значению n , свидетельствует лишь о том, что связь между химией и подсчетом энергетических уровней не так проста, как можно было бы подумать. Однако сейчас известно, что калий и кальций, два первых элемента в четвертом ряду, имеют электроны на уровне $n = 4$, $l = 0$, а следующие 10 элементов (от скандия до цинка) имеют электроны на запоздалых уровнях $n = 3$, $l = 2$.

Чтобы понять, почему заполнение уровней $n = 3$ и $l = 2$ откладывается до скандия, нужно объяснить, почему уровни $n = 4$, $l = 0$, на которых находятся электроны в калии и кальции, обладают меньшей энергией, чем уровни $n = 3$, $l = 2$.

Помните, что «основное состояние» атома будет характеризоваться конфигурацией электронов с самой низкой энергией, поскольку в любом возбужденном состоянии атом будет всегда терять энергию при испускании фотона. И говоря, что «этот атом содержит такие-то электроны, находящиеся на таких-то энергетических уровнях», мы сообщаем вам конфигурацию электронов с самой низкой энергией. Конечно, мы еще не пытались подсчитывать энергетические уровни, так что пока не можем и расположить их по возрастанию или убыванию энергии. Подсчитать разрешенную для электрона энергию для атомов более чем с двумя электронами на самом деле очень сложно, и даже случай для двух электронов (атом гелия) не так-то прост. Предположение о ранжировании уровней по увеличению числа n – результат гораздо более простых расчетов по атому водорода, для которого верно, что уровень $n = 1$ обладает наименьшей энергией, за ним следуют уровни $n = 2$, потом уровни $n = 3$ и т. д.

Очевидный вывод из сказанного – элементы на правом краю периодической таблицы соответствуют атомам, множество уровней которых заполнено до конца. Например, для гелия заполнен уровень $n = 1$, для неона – уровень $n = 2$, у аргона плотно заселен уровень $n = 3$, по крайней мере для $l = 0$ и $l = 1$. Мы можем еще немного развить эти идеи, таким образом поняв ряд очень важных положений в химии. К счастью, мы пишем не учебник по химии, так что можно говорить кратко. Может показаться, что мы пытаемся уложить всю тему в один абзац, но все же

попробуем.

Основное наблюдение в том, что атомы могут скрепляться, обмениваясь электронами: мы встретимся с этой идеей в следующей главе, когда будем разбираться, как пара атомов водорода соединяется в молекулу водорода. Общее правило таково: элементы «предпочитают» полностью заполнять все свои энергетические уровни. В случае с гелием, неоном, аргоном и криптоном уровни уже заполнены, так что этим элементам уже «хорошо»: им «неинтересно» реагировать с другими. Другие же элементы могут «пытаться» заполнить свои уровни, обмениваясь электронами с другими элементами. Водороду, например, нужен один дополнительный электрон для заполнения уровня $n = 1$. Этого можно достичь, обменявшись электронами с другим атомом водорода. Таким образом формируется молекула водорода; ее химическая запись – H_2 . Это обычная форма существования водорода. У углерода 4 электрона из возможных 8 на уровнях $n = 2$, $l = 0$ и $l = 1$, и ему «хотелось бы» получить еще 4, чтобы заполнить все уровни. Этого можно добиться путем соединения с четырьмя атомами водорода. Образуется CH_4 – газ, известный под названием метан.

Атом углерода может соединиться и с двумя атомами кислорода, которые сами нуждаются в двух электронах, чтобы закончить уровень $n = 2$. Это приводит к образованию CO_2 – двуокиси углерода. Кислород может закончить свой уровень и с помощью двух атомов водорода, образуя воду – H_2O . И так далее. Это основы химии: атомы стремятся заполнить свои энергетические уровни электронами, даже посредством реакции с соседом. Это их «желание», которое восходит к стремлению находиться в состоянии наименьшей энергии, управляет образованием всех соединений – от воды до ДНК. В мире, который богат на водород, кислород и углерод, легко понять, почему так часто встречаются углекислый газ, вода и метан.

Это все очень вдохновляет, но нужно объяснить и последний кусочек головоломки: почему только два электрона могут занимать каждый энергетический уровень? Так утверждает принцип Паули, и он очень важен для связи в единое целое всего, что мы обсуждаем. Без него электроны толпились бы на низшем энергетическом уровне вокруг каждого ядра, и никакой химии не было бы. Это не самая приятная перспектива, потому что тогда не было бы молекул, а следовательно, и жизни на Земле.

Утверждение о том, что каждый энергетический уровень могут занимать два и только два электрона, кажется каким-то произвольным. До того как эта идея была впервые предложена, никто не высказывал предположений по этому поводу. Первый прорыв в этой области был

совершен Эдмундом Стоунером, сыном профессионального игрока в крикет (который прошел восемь калиток в игре с Южной Африкой в 1907 году, если вы читаете Wisden Cricketers' Almanack) и бывшим студентом Резерфорда, впоследствии возглавившим физический факультет в Университете Лидса. В октябре 1924 года Стоунер предположил, что на каждом энергетическом уровне (n , l , m) должно находиться два электрона. Паули развил идеи Стоунера и в 1925 году опубликовал правило, которому годом позже Дирак присвоил его имя. Принцип Паули состоит в том, что ни одна пара электронов в атоме не может иметь одни и те же квантовые числа. Однако он столкнулся с проблемой: все указывало на то, что на самом деле два электрона могут иметь одинаковый набор значений n , l и m . Паули обошел проблему, просто введя новое квантовое число. Это был анзац: он не знал, чему соответствует это число, но оно могло принимать одно из всего двух значений. Паули признавался: «Более точно причин существования этого правила мы указать не можем». Новое открытие случилось в 1925 году и было изложено в работе Джорджа Уленбека и Сэмюэла Гаудсмита. В поисках возможности проведения точных измерений атомных спектров они связали дополнительное квантовое число Паули с реальным физическим свойством электрона, которое носит название *спин*^[32].

Основная идея спина довольно проста и восходит еще к 1903 году: она значительно старше квантовой теории. Через несколько лет после открытия собственно электрона немецкий физик Макс Абрахам предположил, что электрон – это мельчайшая вращающаяся электрически заряженная сфера. Если бы это было верно, то электроны подвергались бы действию магнитных полей в зависимости от ориентации поля по отношению к оси их вращения. В статье 1925 года, опубликованной через три года после смерти Абрахама, Уленбек и Гаудсмит отмечали, что модель вращающегося шара не может быть верной, потому что для подтверждения экспериментальных данных электрон должен вращаться быстрее скорости света. Но сам дух идеи был верен: у электрона действительно есть свойство под названием спин, которое действительно влияет на его поведение в магнитном поле. Однако на самом деле идея спина – это непосредственное и довольно тонкое последствие теории специальной относительности Эйнштейна, получившее должную оценку только после того, как Поль Дирак в 1928 году записал уравнение, описывающее квантовое поведение электрона. Для наших целей сейчас нужно только указать, что существует два типа электрона, которые мы будем называть «спин вверх» и «спин вниз». Они отличаются

противоположными значениями момента вращения, то есть словно бы вращаются в противоположных направлениях. Очень жаль, что Абрахам лишь немного не дожил до открытия истинной природы спина электрона, потому что так и не отказался от своего подозрения, что электрон – это мельчайшая сфера. В некрологе Абрахаму в 1923 году Макс Борн и Макс фон Лауэ писали: «Он был достойным оппонентом, сражался достойным оружием и не старался замаскировать поражения причитаниями и не относящимися к делу аргументами... Он любил свой абсолютный эфир, свои уравнения поля, свой неподвижный электрон, как повзрослевший человек любит свою первую страсть, воспоминания о которой не затмит никакой последующий опыт». Если бы все наши оппоненты были такими, как Абрахам!

В оставшейся части этой главы мы попытаемся объяснить, почему электроны ведут себя столь странным образом, описанным в принципе Паули. Как обычно, постараемся по максимуму использовать наши квантовые циферблаты. Для этого подумаем, что произойдет при «отталкивании» электронов друг от друга. На рис. 7.3 показан конкретный сценарий, когда два электрона, помеченные цифрами 1 и 2, начинают свое движение в одном месте и заканчивают в каком-то другом. Конечные точки мы отметили буквами *A* и *B*. Заштрихованные круги напоминают, что мы пока не думали по поводу того, что случается при взаимодействии двух электронов друг с другом (подробности этого процесса для нынешних целей не имеют особого значения).

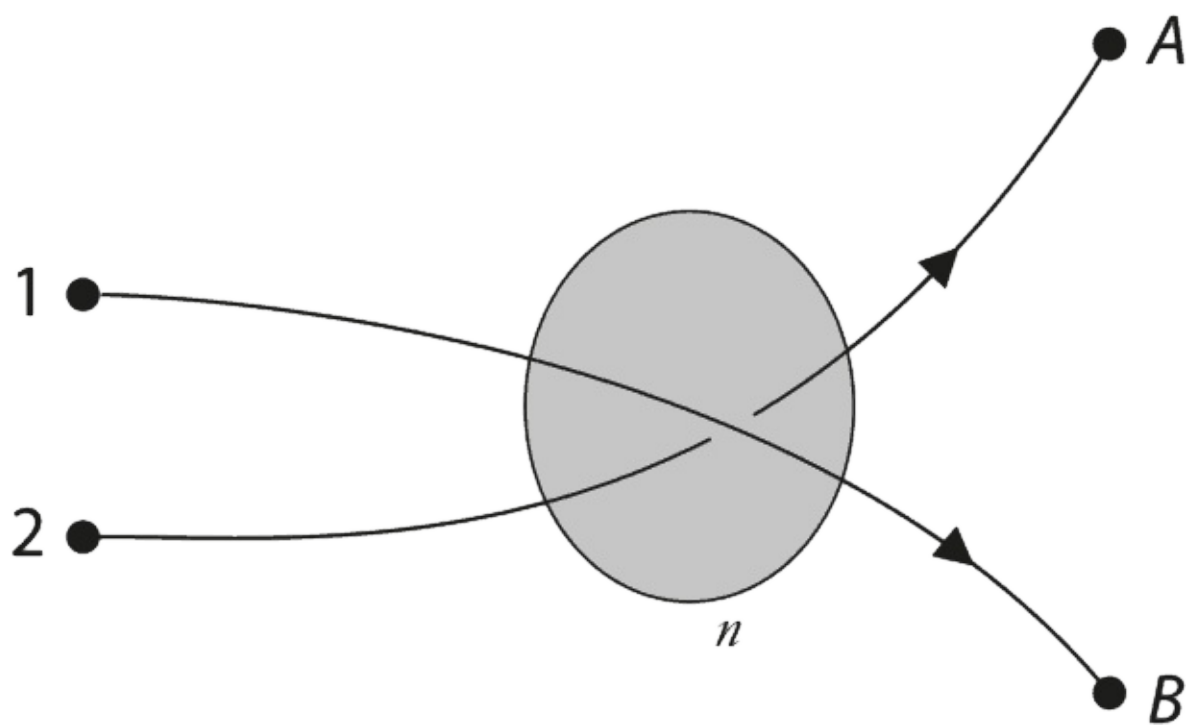
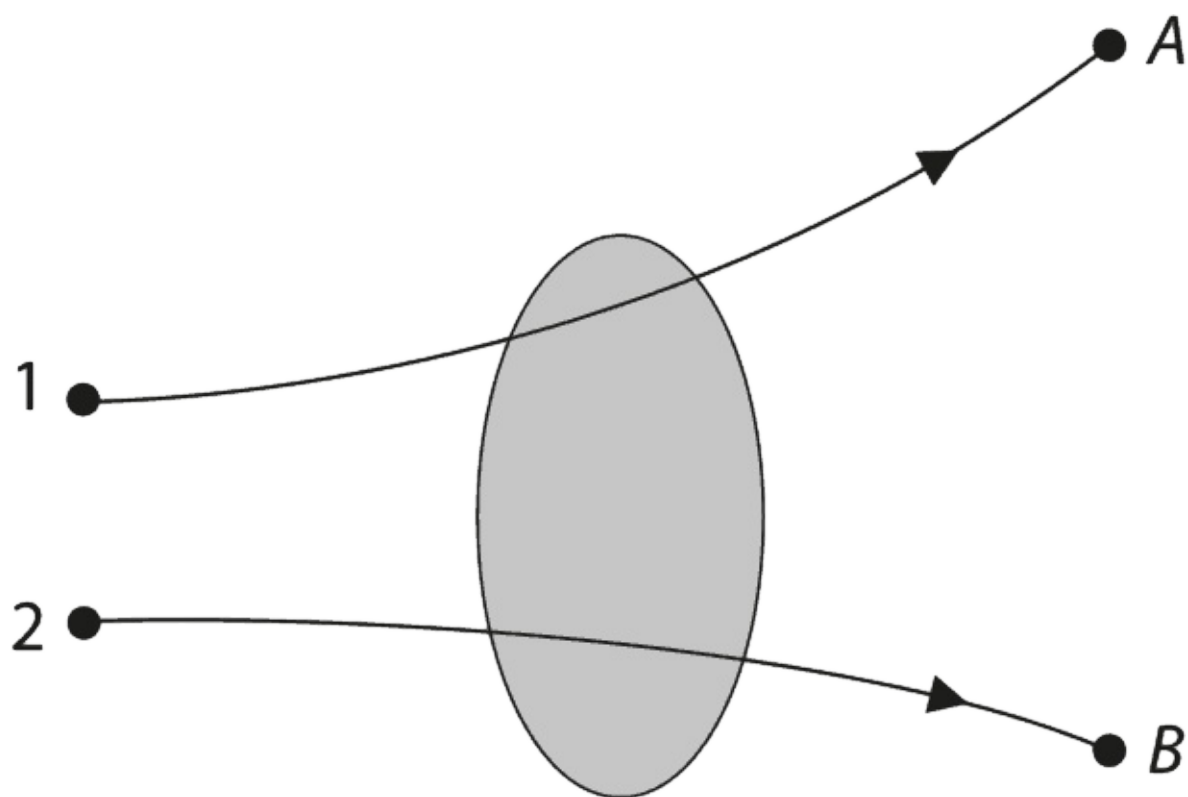


Рис. 7.3. Разлет двух электронов

Нужно представить, что электрон 1 выпрыгивает из исходной точки и заканчивает движение в точке *A*. Точно так же электрон 2 «приземляется» в точке *B*. Это показано на верхней иллюстрации. На самом деле аргумент, который мы намерены предъявить, прекрасно работает, даже если игнорировать возможность взаимодействия электронов. В этом случае электрон 1 попадает в точку *A* независимо от любых блужданий электрона 2, и вероятность найти электрон 1 в точке *A* и электрон 2 в точке *B* будет всего лишь произведением двух независимых вероятностей.

Например, представим, что вероятность прибытия электрона 1 в точку *A* равна 45 %, а вероятность электрона 2 в точку *B* – 20 %. Вероятность нахождения электрона 1 в точке *A* и электрона 2 в точке *B* равна $0,45 \times 0,2 = 0,09 = 9 \%$. Здесь мы пользуемся обычной логикой, которая говорит, что вероятность подбросить монетку, чтобы выпал орел, и вместе с тем бросить кубик, чтобы выпала шестерка, равны $\frac{1}{2} \times \frac{1}{6}$, что составляет $\frac{1}{12}$ (то есть чуть больше 8 %) ^[33]. Как показано на иллюстрации, у электронов есть и другой способ оказаться в точках *A* и *B*. Электрон 1 может попасть в точку *B*, а электрон 2 – в точку *A*. Допустим, вероятность найти электрон 1 в точке *B* равна 5 %, а вероятность найти электрон 2 в точке *A* – 20 %. Тогда вероятность найти электрон 1 в точке *B* и электрон 2 в точке *A* равна $0,05 \times 0,2 = 0,01 = 1 \%$.

Таким образом, у нас есть два варианта нахождения двух электронов в точках *A* и *B* – один с вероятностью 9 % и один с вероятностью 1 %. Таким образом, вероятность того, что один электрон будет в точке *A*, а другой в точке *B*, если не имеет значения, какой где окажется, должна составлять $9 \% + 1 \% = 10 \%$. Все просто; но неверно.

Ошибка состоит в предположении о том, что вообще можно утверждать, какой электрон попадает в точку *A*, а какой в точку *B*. Что если электроны полностью идентичны? Кажется, что этот вопрос не имеет никакого значения, однако это не так. Кстати, предположение, что квантовые частицы могут быть полностью идентичны, впервые было сформулировано в связи с законом излучения черного тела Планка. Малоизвестный физик Ладислас Натансон еще в 1911 году заметил, что закон Планка несовместим с предположением, что фотоны можно идентифицировать. Иными словами, если бы можно было пометить фотон и отследить его передвижения, закон Планка не получился бы.

Если электроны 1 и 2 совершенно идентичны, можно описать процесс их разлета следующим образом: изначально есть два электрона, а еще через

некоторое время по-прежнему есть два электрона, расположенных в разных местах. Как нам уже известно, квантовые частицы не двигаются по хорошо определенным траекториям, так что даже в принципе невозможно отследить их перемещение. Таким образом, нет смысла утверждать, что электрон 1 появился в точке *A*, а электрон 2 – в точке *B*. Мы просто не можем этого сказать, а стало быть, нет смысла их как-то маркировать. Вот что понимается под «идентичностью» частиц в квантовой теории. И куда же нас заведут подобные рассуждения?

Посмотрите еще раз на рисунок. В нашем конкретном случае две вероятности, которые мы связывали с двумя диаграммами (9 % и 1 %), верны. Однако это еще не все. Мы знаем, что квантовые частицы описываются циферблатами, так что мы должны связать циферблат с электроном 1, прибывающим в точку *A*, при этом размер циферблата будет равен $\sqrt{45}$ %. Точно так же другой циферблат будет связан с электроном 2, прибывающим в точку *B*, и его размер будет равняться $\sqrt{20}$ %. Теперь можно сформулировать новое квантовое правило: оно гласит, что мы должны связать отдельный циферблат с целым процессом, то есть будет существовать циферблат с размером, квадрат которого будет равен вероятности нахождения электрона 1 в точке *A* и электрона 2 в точке *B*. Иными словами, верхней иллюстрации на рис. 7.3 будет соответствовать свой циферблат. Мы видим, что этот циферблат должен иметь размер, равный $\sqrt{9}$ %, поскольку именно с этой вероятностью происходит процесс. Но какое время он будет показывать? Ответ на этот вопрос будет дан в главе 10, и он связан с идеей умножения циферблатов. Для целей же этой главы знать время необязательно; понадобится лишь только что сформулированное новое важное правило, которое стоит даже повторить, потому что оно существенно для всей квантовой теории: мы должны связать *одиночный* циферблат со всеми возможными способами, которыми может идти *весь процесс*. Циферблат, который мы связываем с нахождением одиночной частицы в конкретном месте, – это простейшая иллюстрация нашего правила, и до этого места в книге мы уже продвинулись. Но это особый случай, и раз уж мы начали рассматривать более одной частицы, то правило нуждается в расширении. Это значит, что с верхней иллюстрацией на рисунке связан циферблат размером 0,3. Точно так же есть и второй циферблат размером 0,1 (потому что 0,12 – это 0,01, то есть 1 %), связанный с нижней иллюстрацией на рисунке. Таким образом, у нас есть два циферблата, и нужно найти способ использовать их для определения вероятности найти один электрон в точке *A* и другой в точке *B*. Если бы эти два электрона можно было

отличить друг от друга, ответ был бы очевидным: мы просто сложили бы вероятности (но не циферблаты), связанные с каждой возможностью. У нас получился бы ответ – 10 %.

Но если нет никакого способа определить, какой из изображенных на диаграммах процессов произошел в действительности – что справедливо, если электроны неотличимы друг от друга, – то, следуя логике, которую мы разработали для скачков одиночной частицы из точки в точку, нужно складывать именно циферблаты. Мы стоим на пороге обобщения правила, утверждающего, что для одной частицы нужно складывать циферблаты, связанные со всеми различными способами достижения этой частицей определенной точки, чтобы определить вероятность нахождения частицы в этой конкретной точке. Для системы, состоящей из множества идентичных частиц, нужно сочетать все циферблаты, связанные со всеми возможными способами, которыми эти частицы могут попасть в свои конечные пункты, чтобы определить вероятность их нахождения в этих конечных пунктах. Это достаточно важное положение, чтобы перечитать его несколько раз: должно быть ясно, что этот новый закон сочетания циферблатов служит обобщением закона, который мы использовали для одиночной частицы. Однако вы могли заметить, что мы очень тщательно выбираем термины. Мы не сказали, что циферблаты нужно обязательно *складывать*: мы говорим, что их нужно *сочетать*. И для такой оговорки есть причины.

Самым простым на вид было бы действительно сложить циферблаты. Но прежде чем заняться этим, надо спросить себя, каковы, собственно, основания считать это действие правильным. Это хороший пример того, что в физике не все стоит считать само собой разумеющимся: проверка предположений часто ведет к новым идеям, как и в этом случае. Сделаем шаг назад и подумаем о чем-то как можно более общем – например, представим, что один циферблат переводится или сжимается (или расширяется) до общего сложения циферблатов. Рассмотрим эту возможность более подробно.

Мы говорим: «У меня есть два циферблата, и я хочу сочетать их, чтобы получился один, и я мог с его помощью узнать, какова вероятность нахождения двух электронов в точках *A* и *B*. Как мне их сочетать?» Не будем забегать вперед с ответом, потому что хотим понять, действительно ли стоит воспользоваться сложением циферблатов. Оказывается, мы не очень-то свободны в действиях, и, как ни странно, простое сложение циферблатов – это одна из всего двух возможностей.

Чтобы упростить разговор, будем называть циферблат,

соответствующий движению частицы 1 в точку A и движению частицы 2 в точку B , циферблатом 1. Это циферблат, который связан с верхней иллюстрацией на рис. 7.3. Циферблат 2 соответствует другой возможности, когда частица 1 приходит в точку B . Важно понять: если мы переведем циферблат 1 до сложения с циферблатом 2, то вычисляемая общая вероятность должна быть такой же, как если бы мы таким же образом перевели циферблат 2 перед его сложением с циферблатом 1.

В доказательство этого можно указать, что перемена наименований A и B в наших диаграммах, очевидно, не может ничего изменить. Это просто иной способ описания одного и того же процесса. Но если поменять A на B и наоборот, то и диаграммы на рис. 7.3 поменяются местами. Это значит, что, если мы решим подкрутить циферблат 1 (соответствующий верхней диаграмме) перед его прибавлением к циферблату 2, это действие должно полностью соответствовать смещению циферблата 2 перед его прибавлением к циферблату 1 после того, как мы поменяли их названия. Это логическое соображение жизненно важно для нас, так что его необходимо довести до сознания. Так как мы предположили, что нет возможности определить разницу между двумя частицами, то можно поменять местами их названия. Это значит, что подведение циферблата 1 должно давать тот же результат, что и такое же подведение циферблата 2, поскольку нет никакой возможности эти циферблаты различить.

Приведенное выше наблюдение нельзя назвать скромным или незначительным: оно имеет очень важные последствия, поскольку существует лишь два возможных способа подведения и уменьшения циферблатов, прежде чем сложить их, в результате чего получится конечный циферблат со свойствами, не зависящими от того, какой из исходных циферблатов подвергся обработке. Это показано на рис. 7.4. Верхняя половина рисунка иллюстрирует, что если подкрутить циферблат 1 на 90° и прибавить его к циферблату 2, то получившийся циферблат будет не равен по размеру тому, который получится, если подкрутить на 90° циферблат 2 и прибавить его к циферблату 1. Это можно видеть, потому что, если сначала подкрутить циферблат 1, то новая стрелка, которая показана здесь пунктиром, будет показывать в противоположном по отношению к стрелке циферблата 2 направлении, таким образом частично отменяя этот циферблат. При смещении же циферблата 2 его стрелка продолжает указывать в том же направлении, что и стрелка циферблата 1, так что они прибавляются, образуя более длинную стрелку.

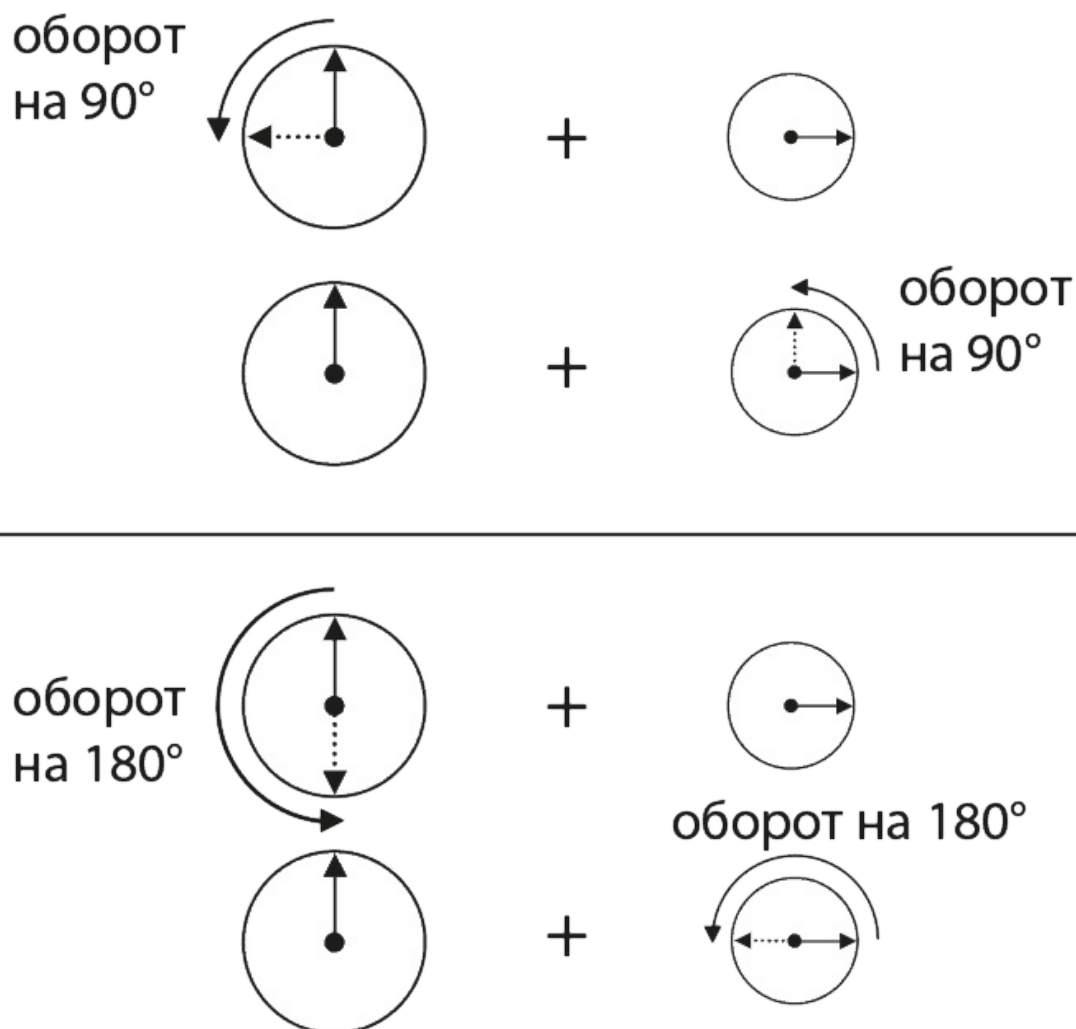


Рис. 7.4. Верхняя часть рисунка показывает, что сложение циферблатов 1 и 2 после смещения циферблата 1 на 90° не эквивалентно их сложению после смещения на те же 90° циферблата 2. Нижняя часть показывает интересную возможность смещения одного из циферблатов на 180° перед сложением

Должно быть ясно, что 90° – это не какой-то особый случай, и другие углы тоже дадут циферблаты, которые зависят от того, который из двух исходных мы предпочли подкрутить.

Очевидное исключение – это перевод стрелки часов на 0° , потому что смещение циферблата 1 на 0° с последующим его сложением с циферблатом 2 – это, разумеется, то же самое, что и смещение циферблата 2 на 0° с последующим его сложением с циферблатом 1. Это значит, что сложение циферблатов без всякого перевода их стрелок – это вполне жизнеспособная возможность. Точно так же подойдет

и подведение обоих циферблатов на одну и ту же величину, но это фактически та же ситуация, что и случай «без смещения»: нужно просто переопределить то, что мы будем называть «12 часами». Это равноценно утверждению, что мы всегда можем смещать любой циферблат на определенную величину, если эта величина равна для всех циферблатов. Это никогда не будет оказывать воздействие на те вероятности, которые мы пытаемся подсчитать.

Нижняя часть рис. 7.4 показывает, что, как бы странно это ни звучало, есть еще один способ сочетания циферблатов: мы можем повернуть один из них на 180° с последующим их сложением. Не получается один и тот же циферблат в двух случаях, но размер при этом остается тем же самым, следовательно, это приводит к той же самой вероятности нахождения одного электрона в точке *A* и другого в точке *B*.

Подобные рассуждения можно привести и по поводу возможности сжатия или расширения одного из циферблатов перед их сложением, потому что если мы сожмем циферблат 1 на определенную величину, прежде чем прибавить его к циферблату 2, то получится будет не тот результат, что при сжатии циферблата 2 на ту же величину перед сложением его с циферблатом 1, и исключений у этого правила нет.

Итак, можно сделать интересный вывод. Хотя мы начали с того, что даровали себе полную свободу действий, оказалось, что, поскольку нет возможности отличить частицы друг от друга, есть лишь два способа сочетания циферблатов: мы можем сложить их либо сразу, либо после поворота стрелки одного из них на 180° . И самое замечательное, что природа идет обоими путями.

В случае с электронами перед сложением циферблатов нужно произвести лишний оборот. В случае с фотонами или бозонами Хиггса нужно сложить циферблаты, не прибегая к повороту. Итак, частицы природы делятся на два типа: те, которым нужен лишний оборот, называются *фермионами*, а те, которые обходятся без него, именуются *бозонами*.

Что определяет, фермион конкретная частица или бозон? Ее спин. Спин, как можно догадаться по этимологии слова (от англ. spin – «вращать»), – это мера углового момента частицы, и фермионы всегда имеют спин, равный полуцелому числу^[34], а у бозонов спин целый. Мы говорим, что у электрона спин равен $\frac{1}{2}$, у фотона – 1, а у бозона Хиггса – 0. Не хотим вдаваться в подробности по поводу спина, потому что они в основном чисто технические. Однако в разговоре о периодической системе оказалось важно, что в результате электроны делятся на два типа

в соответствии с двумя возможными значениями их углового момента (спин, направленный вверх, или спин, направленный вниз). Это пример общего правила, которое гласит: частицы со спином s обычно имеют $2s + 1$ типов, например частицы со спином $\frac{1}{2}$ (то есть электроны) имеют два типа, со спином 1 – три типа, а со спином 0 – один тип.

Взаимосвязь между угловым моментом частицы и нашим способом сочетания часов известна как теорема Паули, или теорема о связи спина со статистикой. Она выводится в том случае, когда формулировка квантовой теории согласуется со специальной теорией относительности Эйнштейна. Точнее говоря, это прямой результат выполнения причинно-следственных законов. К сожалению, выведение теоремы о связи спина со статистикой лежит за пределами уровня этой книги – как, честно говоря, и многих других. В «Фейнмановских лекциях по физике» автору пришлось сказать следующее:

«Мы просим прощения за то, что неспособны элементарно объяснить вам это. Но объяснение существует, его нашел Паули, основываясь на сложных доводах квантовой теории поля и теории относительности. Он показал, что эти факты по необходимости связаны друг с другом; но мы не в состоянии найти способ воспроизвести его аргументы на элементарном уровне. Это, видимо, одно из немногих мест в физике, когда правило формулируется очень просто, хотя столь же простого объяснения ему не найдено».

Вспомнив о том, что Ричард Фейнман вынужден был написать подобное в учебнике университетского уровня, мы можем только поднять руки и сдаться. Но правило само по себе довольно простое, и вам лишь придется поверить нам на слово в его доказательстве: для фермионов поворот необходим, а для бозонов – нет. Судя по всему, поворот служит причиной принципа Паули, а следовательно, и структуры атомов, и теперь, наконец, мы можем дать очень простое объяснение после всей предыдущей кропотливой работы.

Представьте, что точки A и B на рис. 7.3 движутся все ближе и ближе друг к другу. Когда они оказываются совсем близко, циферблат 1 и циферблат 2 должны стать примерно одного размера и показывать примерно одинаковое время. Когда A и B перекрываются, то и циферблаты должны быть идентичными. Это очевидно, поскольку циферблат 1 соответствует частице 1, заканчивающей движение в точке A , а циферблат 2

в этом конкретном случае показывает точно такое же время, поскольку точки *A* и *B* перекрываются. Тем не менее циферблатов по-прежнему два, и мы по-прежнему должны их сложить. Но тут и возникает тонкость: для фермионов один из циферблатов должен быть перед сложением повернут на 180° . Это значит, что циферблаты всегда будут показывать точно противоположное время для случая совпадения точек *A* и *B* (если на одном будет 12 часов, то на другом 6 часов), так что при сложении всегда будет получаться циферблат нулевого размера. Это замечательный результат, поскольку он означает, что вероятность нахождения двух электронов в одной и той же точке всегда будет равна нулю: законы квантовой физики побуждают их избегать друг друга. Чем ближе они друг к другу, тем меньше получающийся циферблат и, соответственно, вероятность такой близости. Это один из способов формулировки знаменитого принципа Паули: электроны избегают друг друга.

Сначала мы собирались показать, что ни одна пара идентичных электронов не может находиться на одном и том же энергетическом уровне в атоме водорода. Мы пока еще окончательно этого не доказали, но замечание о том, что электроны избегают друг друга, разумеется, имеет последствия для атомов и понимания того, почему же мы не проваливаемся сквозь землю. Теперь становится понятно не только то, что электроны в нашей обуви отталкиваются от электронов земной поверхности по правилу отталкивания одноименных зарядов, но и то, что они отталкиваются, потому что естественным образом избегают друг друга в соответствии с принципом Паули. Оказывается, согласно доказательству Дайсона и Ленарда, именно это избегание и не позволяет нам провалиться сквозь землю. Оно же заставляет электроны занимать разные энергетические уровни внутри атомов, определяя их строение, и в итоге служит причиной разнообразия химических элементов, которое мы наблюдаем в природе. Определенно, этот физический закон имеет очень важные для повседневной жизни последствия. В последней главе книги мы расскажем также, как принцип Паули играет ключевую роль в предотвращении гравитационного коллапса некоторых звезд.

В завершение мы должны объяснить, как из того, что ни одна пара электронов не может находиться в одном и том же месте в одно и то же время, следует, что ни у одной пары электронов в атоме не может быть одинаковых квантовых чисел, то есть два электрона не могут иметь одинаковую энергию и спин. Возьмем два электрона с одинаковым спином и докажем, что они не могут пребывать на одном и том же энергетическом уровне. Если бы они находились на одном энергетическом уровне,

то каждый по необходимости описывался бы совершенно одинаковым набором циферблатов, распределенных в пространстве (в соответствии с применимой здесь стоячей волной). Для каждой пары точек в пространстве – обозначим их X и Y – есть два циферблата. Циферблат 1 соответствует «электрону 1 в точке X » и «электрону 2 в точке Y », а циферблат 2 соответствует «электрону 1 в точке Y » и «электрону 2 в точке X ». Из предыдущих рассуждений мы знаем, что эти циферблаты нужно сложить после перевода одного из них на 6 часов, чтобы вычислить вероятность нахождения одного электрона в точке X , а другого в точке Y . Но если два электрона обладают одинаковой энергией, то перед решающим дополнительным поворотом циферблаты 1 и 2 должны быть идентичны. После поворота же они будут показывать противоположное время и, как и раньше, при сложении образуют циферблат, не имеющий размера. Это верно для любого конкретного положения точек X и Y , так что вероятность найти пару электронов в одной и той же конфигурации стоячей волны, то есть обладающих одной и той же энергией, равна нулю. Именно этим в конечном счете и определяется стабильность атомов в нашем организме.

8. Взаимозависимость

До этого времени мы уделяли пристальное внимание квантовой физике изолированных частиц и атомов. Мы выяснили, что электроны находятся внутри атомов в определенных энергетических состояниях, известных как стационарные состояния, хотя атом может быть в суперпозиции нескольких подобных состояний. Мы определили также, что электрон может перейти из одного энергетического состояния в другое с сопутствующим испусканием фотона. Испускание фотона, таким образом, свидетельствует о наличии энергетических состояний у атома; мы повсюду видим характерные цвета атомных переходов. Однако наш физический опыт связан с восприятием множества сгруппированных между собой атомов, и уже поэтому пора начать разбираться с тем, что происходит, когда атомы группируются.

Размышления над сочетаниями атомов поведут нас к химическим связям, разнице между проводниками и изоляторами и в конце концов к полупроводникам. Эти интересные материалы обладают свойствами, которые можно использовать для создания мельчайших устройств, способных производить базовые логические операции. Такие устройства называются *транзисторами*, и при объединении многих миллионов транзисторов можно создать микрочипы. Как мы увидим, теория транзисторов имеет квантовую природу. Трудно понять, как можно было бы изобрести и использовать транзисторы без квантовой теории, а современный мир без них уже нельзя представить. Это замечательный пример научной проницательности: мы столько времени описывали противоречащие интуиции подробности исследований природы, движимых чистым любопытством, и вот оказывается, что они привели к революции в повседневной жизни. Уильям Шокли, один из изобретателей транзистора и глава Группы физики твердого тела в компании Bell Telephone Laboratories, прекрасно показал, чем чреваты попытки классифицировать и контролировать научные знания^[35]:

«Я хотел бы выразить свою точку зрения на определения, которыми часто пытаются классифицировать типы физических исследований: например, чистая, прикладная, неограниченная, фундаментальная, базовая, академическая, промышленная, практическая физика и т. д. Мне кажется, что слишком часто

некоторые слова используются в пренебрежительном смысле: с одной стороны, это принижает практические цели производства полезных вещей, а с другой – отрицает возможное долгосрочное значение исследований в новых отраслях знания, где нельзя предсказать появление полезных результатов. Меня часто спрашивали, например, относится планируемый мной эксперимент к чистой или прикладной науке; я же считаю более важным понять, может ли эксперимент принести новые, желательно остающиеся на века знания о природе. Если получить такие знания удастся, то это, на мой взгляд, и есть хорошая фундаментальная наука; и это гораздо более важный показатель, чем то, руководствуется ли экспериментатор жаждой чисто эстетического удовлетворения или пытается повысить стабильность работы транзистора высокого напряжения. Для высшего блага человечества требуется и тот и другой подходы».

Поскольку так говорил не кто-то, а изобретатель едва ли не самого полезного предмета со времен появления колеса, законодателям и управленцам всего мира стоило бы прислушаться к этим словам. Квантовая механика изменила мир, а новые теории, возникающие в наши дни на переднем краю физики, наверняка смогут еще раз изменить нашу жизнь.

Как всегда, мы начнем с начала: от Вселенной с одной частицей перейдем к рассмотрению Вселенной, где частиц будет две. Представьте себе, например, простую Вселенную, состоящую из двух изолированных атомов водорода; два электрона связаны с двумя отдаленными протонами, вокруг которых вращаются по орбите. Через несколько страниц мы начнем сводить их вместе и посмотрим, что получится, но пока предположим, что они расположены очень далеко друг от друга.

Принцип Паули утверждает, что два электрона не могут находиться в одинаковом квантовом состоянии, потому что это не отличимые друг от друга фермионы. Сначала может появиться соблазн заявить, что, если атомы далеко друг от друга, то два электрона должны пребывать в различных квантовых состояниях, так что и говорить тут не о чем. Но все значительно интереснее. Представьте, что мы помещаем электрон 1 в атом 1, а электрон 2 – в атом 2. Через некоторое время утверждение «электрон 1 все еще в атоме 1» не будет иметь смысла. Он может находиться и в атоме 2, потому что всегда есть вероятность того,

что электрон совершил квантовый скачок. Как мы помним, все, что может произойти, действительно происходит, и электроны вполне могут за мгновение облететь всю Вселенную. На языке мельчайших циферблатов, даже если начать с того, который описывает один из электронов, расположенный вблизи только одного из протонов, придется в следующий миг ввести уже и циферблат вблизи другого протона. И хотя подразумевается, что циферблаты вблизи второго протона будут очень малы, их размеры все же не равны нулю, так что существует конечная вероятность нахождения там электрона. Чтобы более четко представлять себе последствия принципа Паули, нужно перестать мыслить о двух изолированных атомах и перейти к рассмотрению всей системы в целом: у нас есть два протона и два электрона, и наша задача – понять их самоорганизацию. Упростим ситуацию: пренебрежем электромагнитным взаимодействием между двумя электронами, что будет вполне неплохим приближением, если протоны удалены друг от друга, к тому же на ходе наших рассуждений это почти никак не скажется.

Что мы знаем о разрешенной энергии электронов в двух атомах? Для общей идеи можно обойтись без вычислений – тем, что мы уже знаем. Если протоны находятся очень далеко друг от друга (например, в нескольких километрах), то самая низкая разрешенная энергия для электронов должна обязательно соответствовать ситуации, когда они связаны с протонами и образуют два изолированных атома водорода. В этом случае велик соблазн сделать вывод, что самое низкое энергетическое состояние для всей системы с двумя протонами и двумя электронами будет соответствовать двум атомам водорода, которые находятся в своих самых низких энергетических состояниях и полностью игнорируют друг друга. Но каким бы верным это ни казалось, на самом деле это не может быть верным. Мы должны мыслить о системе в целом, а эта система из четырех частиц, как и изолированный атом водорода, должна иметь собственный уникальный спектр разрешенных энергий электрона. И принцип Паули подсказывает, что электроны не могут одновременно быть на совершенно одинаковом энергетическом уровне вблизи каждого протона, находясь в блаженном неведении по поводу существования друг друга^[36].

Кажется, мы должны заключить, что пара идентичных электронов в двух отдаленных атомах водорода не может обладать одинаковой энергией, но мы также сказали, что ожидаем нахождение электронов на самом низком энергетическом уровне, соответствующем идеализированному, полностью изолированному атому водорода. Оба этих

утверждения не могут быть истинными, и, немного подумав, можно понять, каким должен быть выход из положения: в идеализированном и изолированном атоме водорода должны быть два энергетических уровня, а не один, как мы предполагали изначально. Таким образом мы сможем уместить на нем два электрона и не нарушить принципа Паули. Разница между этими двумя энергиями должна быть очень мала, если атомы сильно удалены друг от друга, так что мы можем представить, что атомы не обращают друг на друга внимания. Но на самом деле они не забывают о существовании друг друга, и все из-за вездесущего принципа Паули: если один из электронов находится в одном энергетическом состоянии, то второй электрон должен пребывать в другом, отличном от первого, энергетическом состоянии, и эта тесная связь между двумя атомами сохраняется независимо от того, насколько они удалены друг от друга.

Та же логика распространяется не только на систему из двух атомов: если по Вселенной рассеяны 24 атома водорода, то на каждое энергетическое состояние в мире единственного атома будет приходиться 24 энергетических состояния, принимающих схожие, но не равные друг другу значения. Когда электрон в одном из атомов занимает некое конкретное состояние, он при этом «знает» все состояния оставшихся 23 электронов, как бы далеко те ни находились. Итак, каждый электрон во Вселенной осведомлен о состоянии каждого другого электрона. И останавливаться на электронах необязательно: протоны и нейтроны тоже можно считать фермионами, так что каждый протон знает о других протонах и каждый электрон знает о других электронах. Связь между частицами, из которых состоит наша Вселенная, настолько тесна, что распространяется на всю Вселенную. Связь эта эфемерна в том смысле, что для сильно отдаленных частиц разница энергий настолько мала, что не оказывает сколь-нибудь существенного воздействия на нашу повседневную жизнь.

Это одно из самых странно звучащих утверждений, к которым мы пришли на страницах книги. Кажется, что заявление о взаимосвязи каждого атома во Вселенной с каждым другим – это брешь, через которую может прорваться всякая холистическая бессмыслица. Но на самом деле здесь нет ничего, с чем бы мы не встречались до этого. Вспомните прямоугольную потенциальную яму, рассматриваемую в главе 6. Ширина ямы определяет разрешенный спектр энергетических уровней, и с изменением размера ямы изменяется и спектр энергетических уровней. То же верно и в данном случае: форма ямы, в которой находятся наши электроны, а следовательно, энергетические уровни, которые им разрешено занимать, определяется

положением протонов. Если протонов два, то энергетический спектр определяется положением обоих. А если мы имеем дело с 1080 протонов, формирующих Вселенную, то положение любого из них влияет на форму ямы, в которой находятся 1080 электронов. Существует лишь один набор энергетических уровней, и когда что-то меняется (например, электрон переходит с одного энергетического уровня на другой), то все остальное должно немедленно перестроиться, так чтобы ни одна пара фермионов не оказалась на одинаковом энергетическом уровне.

Идея о том, что электроны немедленно «узнают» все друг о друге, на первый взгляд противоречит теории относительности Эйнштейна. Возможно, мы можем создать какой-то сигнальный аппарат, который будет использовать эти моментальные коммуникации для перемещения информации на скорости выше скорости света. Эта, казалось бы, парадоксальная черта квантовой теории впервые получила оценку в 1935 году – Эйнштейном вместе с Борисом Подольским и Натаном Розеном: Эйнштейн назвал ее «зловещими действиями на расстоянии» и в целом невзлюбил. Прошло определенное время, прежде чем физики осознали, что, несмотря на всю зловещесть, для переноса информации быстрее скорости света эти дальнобойные соответствия использовать нельзя, так что закону причинно-следственных связей ничто не угрожает.

Подобное нездоровое умножение энергетических уровней происходит не по каким-то эзотерическим причинам – это физическое обоснование химических связей. Кроме того, это ключевая причина того, почему одни материалы проводят электричество, а другие нет, а также подспорье в объяснении работы транзистора. Начнем наш путь к транзистору с возвращения к тому «упрощенному» атому, который известен нам из главы 6, где электрон удерживался в потенциальной яме. Эта простая модель не давала возможности верно вычислить энергетический спектр для атома водорода, но научила нас многому в области поведения отдельного атома. Хорошо послужит она и здесь. Возьмем две соединенные прямоугольные ямы и сделаем из них модель двух смежных атомов водорода. Сначала обсудим случай движения одиночного электрона в потенциале, созданном двумя протонами. Верхняя иллюстрация на рис. 8.1 показывает происходящее. Потенциал остается ровным, а потом ныряет вниз, образуя две ямы, что соответствует воздействию двух протонов, удерживающих электроны. Достаточный отступ в центре позволяет удерживать электрон и в левую, и в правую сторону. На техническом жаргоне говорят, что электрон движется в *двухъямном потенциале*.

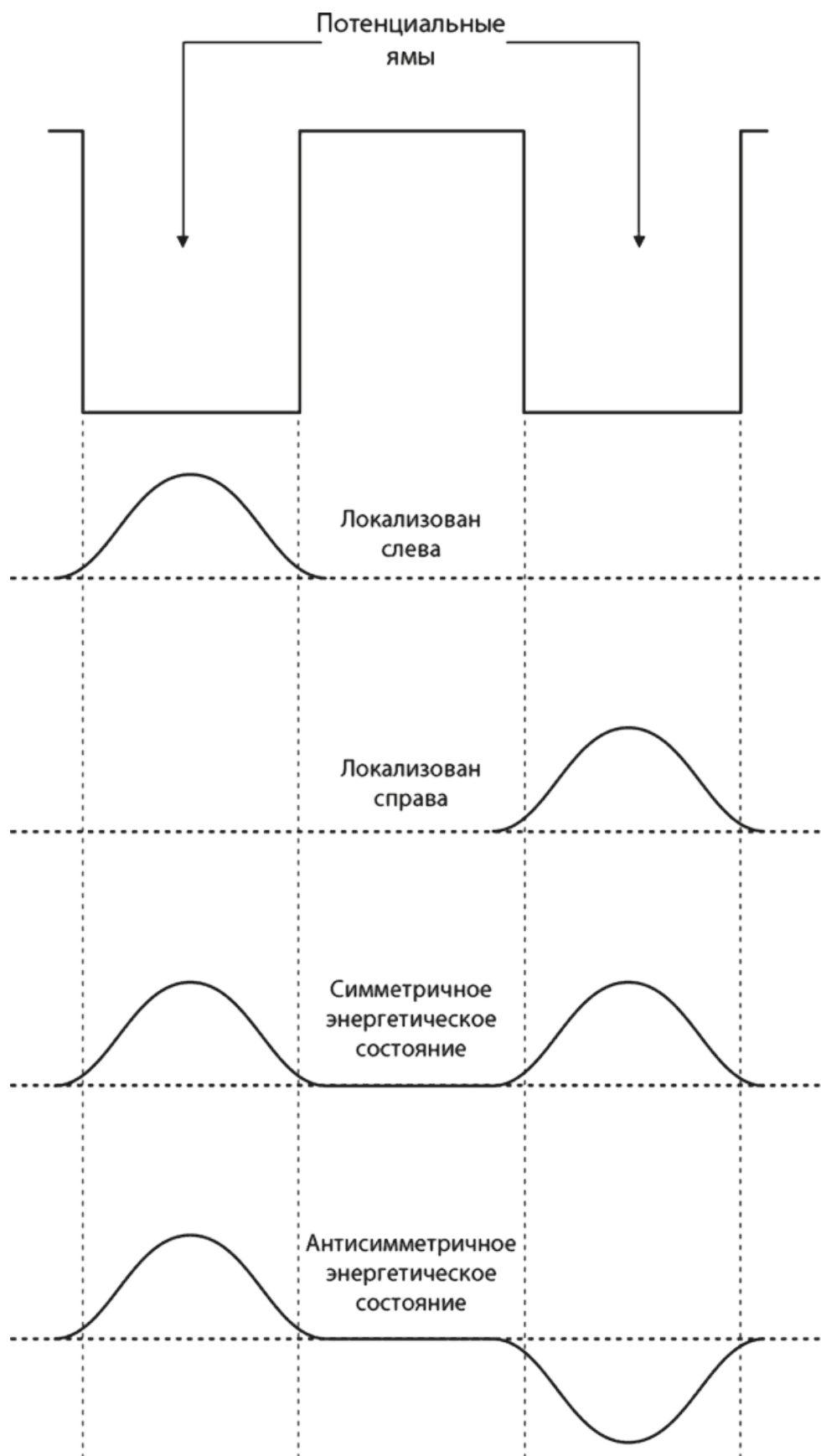


Рис. 8.1. Сверху изображен двухъямный потенциал, а снизу – четыре интересные волновые функции, описывающие электрон в этом потенциале. Только две нижние функции соответствуют электрону с определенной энергией

Наша первая задача – с помощью этой модели понять, что происходит, когда мы сводим два атома водорода: мы увидим, что, когда они в достаточной мере сближаются, образуется молекула. После этого поразмышляем над системами, состоящими более чем из двух атомов, что позволит оценить, что происходит внутри твердого тела. Если ямы очень глубоки, можно воспользоваться результатами из главы 6 и определить, чему должны соответствовать наименьшие электронные состояния. Для одиночного электрона в одиночной прямоугольной яме самое низкое электронное состояние описывается волной-синусоидой, длина которой в два раза превышает размер ящика. Следующему за ним состоянию соответствует синусоида, равная по длине размеру ящика, и т. д. Если поместить электрон в одну часть двойной ямы и если эта яма достаточно глубока, разрешенные энергии должны быть близки по значению к значениям для электрона, удерживаемого в одиночной глубокой яме, так что волновая функция будет очень напоминать синусоиду.

Однако наше внимание сейчас будет приковано к незначительным различиям между идеально изолированным атомом водорода и атомом водорода в удаленной друг от друга паре.

Можно с уверенностью ожидать, что две верхние волновые функции, изображенные на рис. 8.1, соответствуют функциям для одиночного электрона, расположенного в левой или правой яме (помните, что слова «атом» и «яма» в данном случае взаимозаменяемы). Волны – почти синусоиды, их длина равняется двойной ширине ямы. Поскольку волновые функции идентичны по форме, можно сказать, что они должны соответствовать частицам одинаковой энергии. Но это не может быть верным, потому что, как мы уже говорили, должна быть очень небольшая вероятность, что электрон может перескочить из одной ямы в другую независимо от того, насколько глубоки эти ямы и как они удалены друг от друга. Мы намекнули на эту возможность, изобразив некоторое «просачивание» волн-синусоид через стенки ямы, что отражает как раз ту незначительную вероятность нахождения ненулевых циферблатов в соседней яме.

То, что у электрона всегда есть конечная возможность перескочить

из одной ямы в другую, означает, что две верхние волновые функции на рис. 8.1 не могут соответствовать электрону с определенной энергией, потому что из главы 6 нам известно, что такой электрон описывается стоячей волной, форма которой не меняется со временем, или набором циферблатов, размеры которых не меняются со временем. Если с течением времени в изначально пустой яме образуются новые циферблаты, форма волновой функции, разумеется, также изменяется. Итак, состояние определенной энергии соответствует двойной яме? Ответ таков: состояния должны быть более демократичными, выражая равную возможность обнаружения электрона в любой из ям. Это единственный способ образовать стоячую волну и не дать волновой функции метаться туда-сюда, от одной ямы к другой.

Две нижние волновые функции с рис. 8.1 как раз обладают этим свойством. Именно так и выглядят самые низкие энергетические состояния. Это единственные представимые стационарные состояния, которые выглядят как *одноямные волновые функции* для каждой индивидуальной ямы и при этом описывают электрон, с одинаковой вероятностью находящийся в любой из ям. Это и есть те два энергетических состояния, которые, как мы выяснили, могут присутствовать, если поместить два электрона на орбиту вокруг двух удаленных протонов и получить два почти идентичных атома водорода в соответствии с принципом Паули. Если один электрон описывается одной из двух этих волновых функций, то другой электрон должен описываться второй – так требует принцип Паули^[37].

Если ямы достаточно глубоки или атомы достаточно удалены, то две энергии будут почти равны, при этом они станут почти равны самой низкой энергии частицы, удерживаемой в одиночной изолированной яме. Не нужно беспокоиться по поводу того, что одна из волновых функций словно бы встала с ног на голову: не забывайте, что при определении вероятности найти частицу в каком-либо месте значение имеет только размер циферблата. Иными словами, мы можем обратить все нарисованные в этой книге волновые функции и при этом нисколько не изменить их физического содержания. «Частично вставшая на голову» волновая функция (на рисунке она подписана как «антисимметричное энергетическое состояние») поэтому продолжает описывать равную суперпозицию электрона, удерживаемого в левой яме, и электрона, удерживаемого в правой яме. Но важно заметить, что симметричная и антисимметричная волновые функции не полностью совпадают (и не должны, а то Паули бы расстроился). Чтобы убедиться в этом,

достаточно посмотреть на поведение этих двух волновых функций самой низкой энергии в области между ямами.

Одна волновая функция симметрична по отношению к центру двух ям, а другая антисимметрична (так они и помечены на рисунке). Под симметрией мы имеем в виду то, что левая волна зеркально отражает правую. Под антисимметрией – то, что левая волна будет зеркальным отражением правой только после того, как повернется вверх ногами. Терминология не так важна. Важно то, что в области между двумя ямами эти волны различаются. Именно эта незначительная разница и показывает, что они описывают состояния с очень мало различающимися энергиями, но все же различающимися. Поэтому поворот одной из волн вверх ногами действительно имеет значение, но очень небольшое, если ямы достаточно глубоки или достаточно взаимоудалены.

Если считать, что частицы имеют определенную энергию, можно запутаться, потому что, как мы только что выяснили, они описываются волновыми функциями, имеющими одинаковый размер в обеих ямах. Это подразумевает равную вероятность обнаружения электрона в обеих ямах, даже если эти ямы разделяет вся Вселенная.

Как изобразить происходящее в том случае, когда мы помещаем один электрон в одну яму, а второй электрон в другую? Мы уже говорили, что ожидаем наполнения изначально пустой ямы циферблатами, что будет отображать вероятность того, что частица может перескочить с одной стороны на другую. Мы даже намекнули на ответ, сказав, что волновая функция «размазывается» туда-сюда. Чтобы увидеть, как это происходит в действительности, заметим, что можно выразить состояние, локализованное на одном из протонов, через сумму двух волновых функций с самой низкой энергией. Мы показали это на рис. 8.2, но что это значит? Если электрон находится в определенное время в конкретной яме, это предполагает, что у него отсутствует определенная энергия. А именно: измерение его энергии даст значение, равное одному из двух возможных значений, соответствующих двум состояниям определенной энергии, которые образуют волновую функцию. Таким образом, электрон находится в двух энергетических состояниях. Мы надеемся, что на этой стадии книги подобная идея вам уже не в новинку. Но вот что интересно: поскольку эти два состояния обладают не совсем одинаковой энергией, стрелки их циферблатов вращаются с немного разной скоростью.

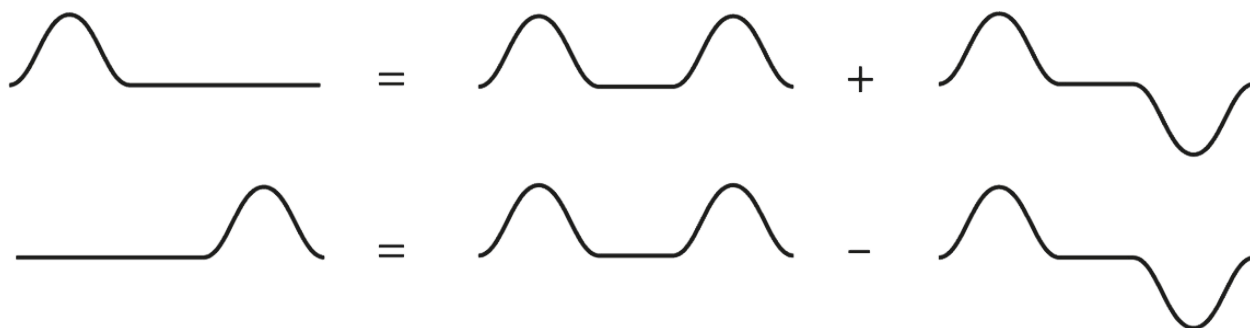


Рис. 8.2. Вверху: электрон, локализованный в левой яме, можно представить как сумму двух состояний с самой низкой энергией. Внизу: точно так же электрон, локализованный в правой яме, можно представить как разность двух состояний с самой низкой энергией

В результате частица, изначально названная локализованной вокруг одного протона волновой функцией, со временем будет описываться волновой функцией, размещенной вокруг другого протона. Не вдаваясь в детали, достаточно сказать, что этот феномен аналогичен тому, как две звуковые волны примерно одной частоты складываются, давая в результате волну, которая сначала будет громкой (когда две волны находятся в фазе), а затем, через некоторое время, тихой (когда две волны окажутся в противофазе). Это явление называется *биениями*. Когда частота волн становится все ближе, временной интервал между громким и тихим периодами увеличивается, пока, наконец, волны не обретают совершенно одинаковую частоту, образуя чистый тон. Все это знакомо любому музыканту, который, возможно, неосознанно пожинает плоды этой сферы волновой физики, пользуясь камертоном. То же самое происходит и со вторым электроном, расположенным во второй яме. Он тоже со временем переходит из одной ямы в другую, и его поведение с зеркальной точностью отражает поведение первого электрона. Хотя в начале эксперимента один электрон находится в одной яме, а другой – во второй, через довольно долгое время электроны поменяются местоположением.

Теперь используем то, что усвоили ранее. Очень интересная физика происходит, когда мы начинаем приближать атомы друг к другу. В нашей модели приближение атомов соответствует сужению барьера, отделяющего две ямы. Когда барьер истончается, волновые функции начинают сливаться, и вероятность того, что электрон окажется между двумя протонами, увеличивается. Рис. 8.3 иллюстрирует, как выглядят четыре волновые функции с самой низкой энергией, когда барьер становится тоньше.

Интересно, что волновая функция с самой низкой энергией начинает напоминать волну-синусоиду с самой низкой энергией, которую мы получили бы, если бы имели дело с одиночным электроном и одиночной широкой ямой. То есть два пика сливаются, образуя единый пик (с небольшим углублением). В то же время волновая функция для чуть более высокой энергии тоже весьма похожа на волну-синусоиду, соответствующую чуть более высокой энергии для одиночной широкой ямы. Этого и следовало ожидать, потому что чем уже барьер между ямами, тем слабее его эффект, и со временем, когда барьера вовсе не останется, эффект его станет равен нулю, так что наш электрон будет вести себя точно так же, как в одиночной яме.

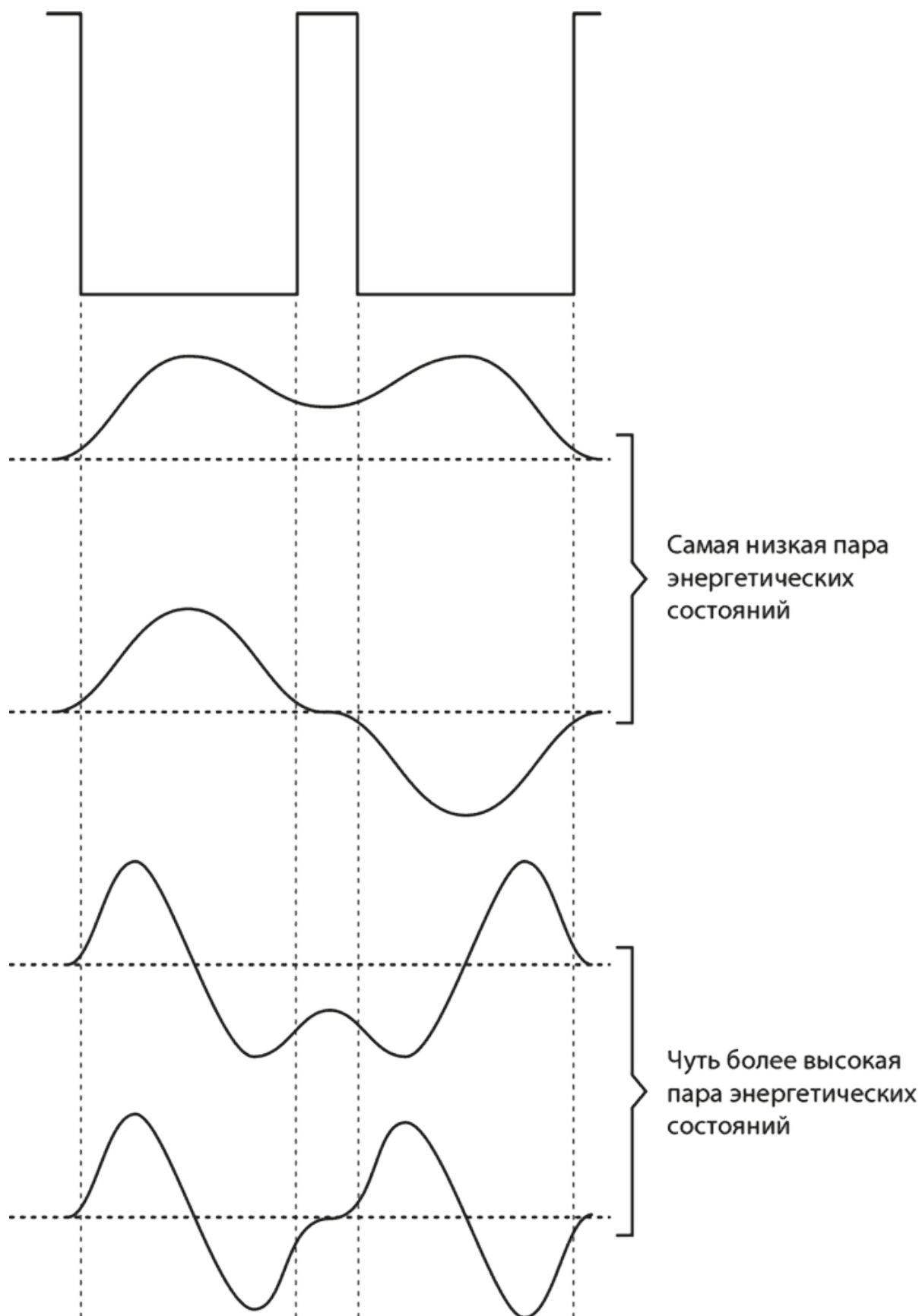


Рис. 8.3. Напоминает рис. 8.1, только ямы находятся ближе друг к другу. «Протечка» в пространство между ямами возрастает. В отличие от рис. 8.1, мы показываем также волновые функции, соответствующие паре энергетических уровней с чуть более низкой энергией, чем минимальная

Увидев, что происходит в крайних случаях (когда ямы находятся очень далеко и очень близко друг от друга), мы можем закончить картину рассмотрением варьирования разрешенных энергий электрона при уменьшении расстояния между ямами. Мы зарисовали результаты для четырех самых низких энергетических уровней на рис. 8.4. Каждая из четырех линий соответствует одному из четырех нижних энергетических уровней, и рядом с ними мы начертили соответствующие волновые функции. Правый край рисунка показывает волновые функции при большом расстоянии между ямами (см. также [рис. 8.1](#)). Как мы и ожидали, разница между энергетическими уровнями электронов в каждом колодце почти не ощутима. Однако когда ямы сходятся, энергетические уровни начинают отдаляться друг от друга (сравните волновые функции слева с изображенными на рис. 8.3). Интересно, что энергетический уровень, соответствующий антисимметричной волновой функции, растет, а соответствующий симметричной – уменьшается.

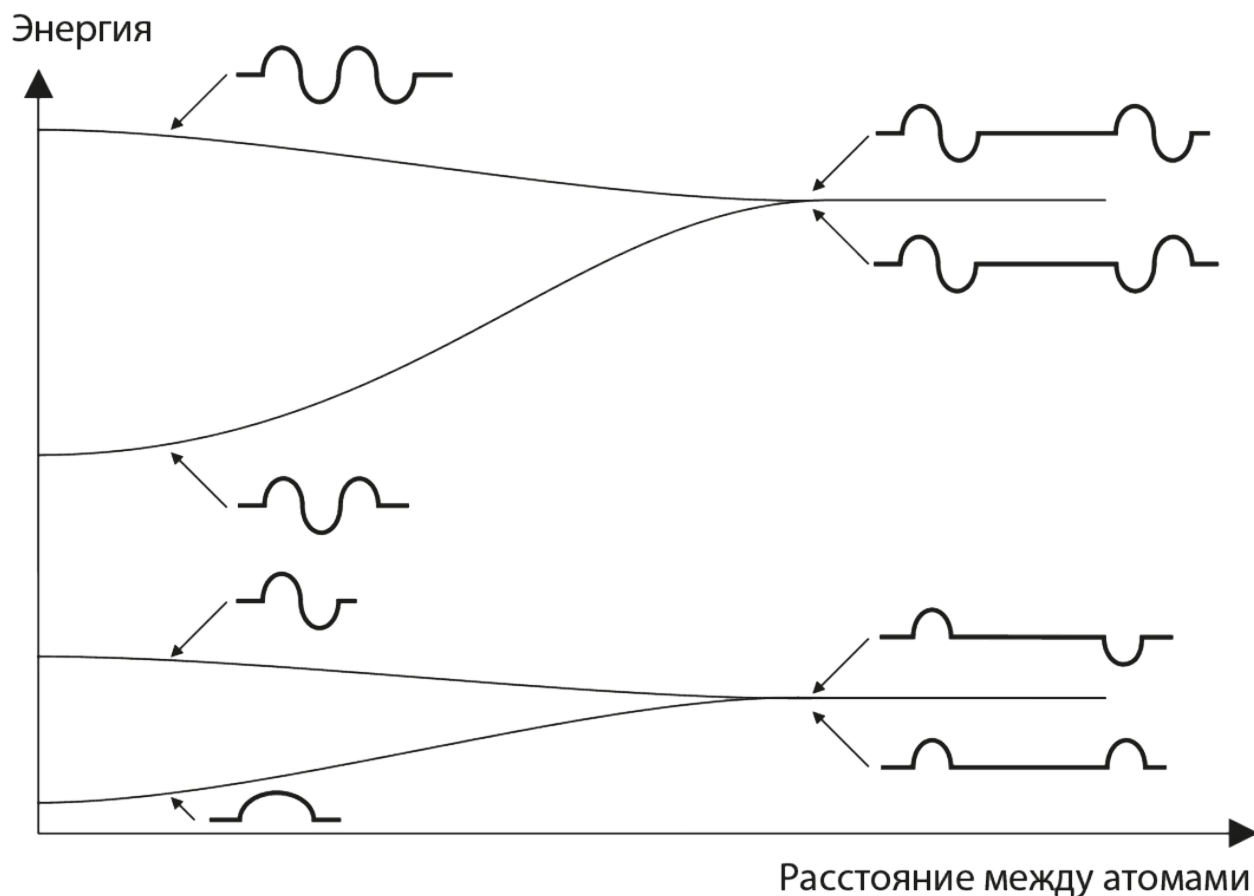


Рис. 8.4. Вариант разрешенных энергий электрона при изменении расстояния между ямами

Это имеет глубокие последствия для реальной системы из двух протонов и двух электронов – то есть двух атомов водорода. Помните, что в реальности два электрона могут находиться на одном энергетическом уровне, если имеют противоположные спины. Это значит, что они оба могут поместиться на самом низком (симметричном) энергетическом уровне, а самое главное – что этот уровень теряет энергию, когда атомы сходятся. Следовательно, для двух удаленных атомов сближение будет энергетически благоприятно. Именно так и происходит в природе^[38]: симметричная волновая функция описывает систему, в которой электроны распределены между двумя протонами более ровно, чем можно было бы ожидать от «отдаленной» волновой функции, и, поскольку эта «распределяющая» конфигурация обладает низкой энергией, атомы притягиваются друг к другу. Это притяжение в какой-то момент прекращается, поскольку оба протона заряжены положительно и как таковые не могут не отталкиваться (и из-за равных зарядов

электронов в том числе), но это отталкивание превосходит межатомное притяжение лишь на расстояниях меньше 0,1 нм (при комнатной температуре).

В результате пара атомов водорода в состоянии покоя окажется вместе. У этой пары связанных атомов водорода есть свое название: это молекула водорода.

Прикрепление двух атомов друг к другу посредством обмена электронами носит название *ковалентной связи*.

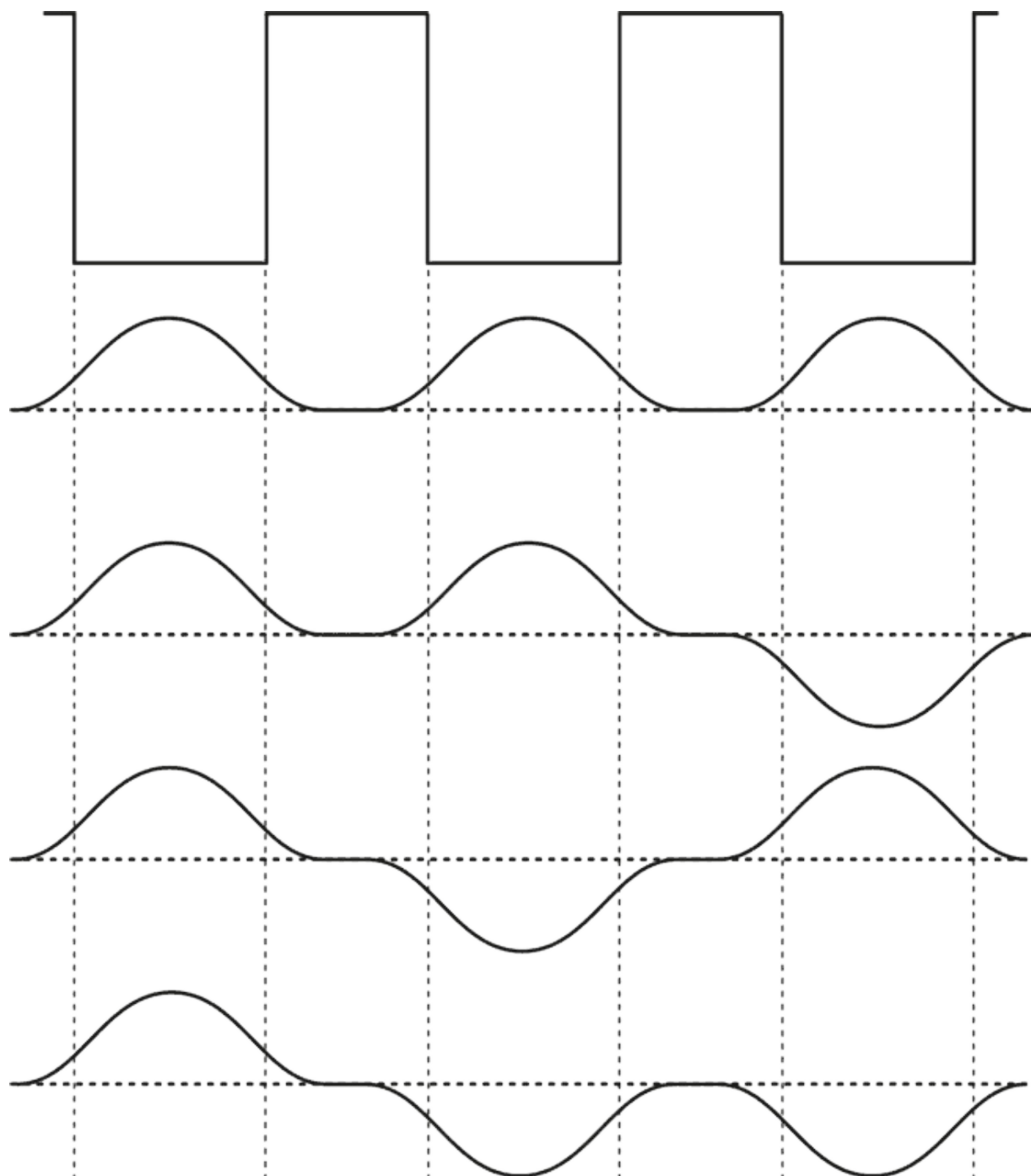
Вернемся к верхней волновой функции на рис. 8.3: примерно так выглядит ковалентная связь в молекуле водорода. Помните, что высота волны соответствует вероятности нахождения электрона в конкретной точке^[39]. Над каждой ямой, то есть вокруг каждого протона, наблюдается пик, и это сообщает нам, что каждый электрон все еще более вероятно найти вблизи одного или другого протона. Но при этом существует и значительная вероятность того, что электроны будут располагаться и между протонами.

Химики говорят, что при ковалентной связи атомы «делят друг с другом» электроны, и это мы здесь и наблюдаем – даже в нашей модели с двумя ямами. Помимо молекулы водорода, тенденцию атомов делиться электронами мы видели, говоря о химических реакциях.

Этот вывод нас полностью удовлетворяет. Мы выяснили, что для атомов водорода, расположенных очень далеко друг от друга, тонкие различия между двумя самыми низкими энергетическими состояниями имеют лишь академический интерес, хотя они и навели нас на мысль о том, что каждый электрон во Вселенной знает обо всех остальных ее электронах. И эта мысль просто завораживает. С другой стороны, два состояния начинают все дальше расходиться, когда протоны сходятся, и более низкое состояние начинает со временем описывать уже молекулу водорода. Теперь в дело включается не просто академический интерес, потому что ковалентная связь – причина того, что вы не просто множество атомов, размазанных в бесформенную кучу.

Продолжим эту интеллектуальную линию и подумаем, что происходит, когда вместе собирается более двух атомов. Три больше двух, так что начнем с рассмотрения трехъямного потенциала, показанного на рис. 8.5. Как обычно, нужно представить, что каждое углубление – это атом. Здесь должно быть три самых низких энергетических состояния, но при взгляде на рисунок легко решить, что на каждое состояние одиночного колодца приходится по четыре. Те четыре состояния, которые мы имеем в виду, показаны на рисунке и соотносятся с волновыми функциями, которые либо

симметричны, либо антисимметричны по отношению к центру двух потенциальных барьеров^[40]. Этот подсчет не может быть верным, потому что иначе получилось бы, что в этих четырех состояниях могли бы находиться четыре одинаковых фермиона, нарушая тем самым принцип Паули. Чтобы принцип Паули соблюдался, энергетических состояний должно быть только три – и их, разумеется, именно столько.



$$\text{Square Wave} = \text{Sine Wave} + \text{Third Harmonic} - \text{Fifth Harmonic}$$

Рис. 8.5. Тройная яма, моделирующая ряд из трех атомов, и возможные волновые функции с самой низкой энергией. Внизу показано, как из трех остальных волн можно получить нижнюю

Чтобы убедиться в этом, нужно отметить, что мы всегда можем записать одну из четырех волновых функций на этом рисунке как сочетание трех других. В нижней части рисунка показано, как это работает в данном случае; мы продемонстрировали, как получить последнюю волновую функцию путем сложения и вычитания трех остальных.

Определив три самых низких энергетических состояния для частицы, находящейся в трехъямном потенциале, можем задаться вопросом, как в данном случае будет выглядеть рис. 8.4, и не удивляться, что выглядеть его аналог будет очень похоже – только пара разрешенных энергетических состояний превратится в трио.

Но хватит о трех атомах – мы сразу же переносим внимание на цепочку из множества атомов. Это особенно интересно, потому что именно здесь содержатся ключевые идеи, которые позволят многое понять о происходящем внутри твердых тел. Если существует N ям (при моделировании цепи из N атомов), то для каждой разрешенной энергии в одиночной яме будет N энергий. Если N будет равняться чему-то вроде 1023, что типично для количества атомов в небольшом куске твердого материала, то происходит огромное количество слияний. В результате рис. 8.4 будет в этом случае выглядеть примерно как рис. 8.6. Вертикальная пунктирная линия показывает, что у атомов, отделенных соответствующим расстоянием, электроны могут иметь лишь определенные разрешенные энергии. Это никак не может вызвать удивления (а если все еще удивляет, лучше начать читать эту книгу заново), но интересно, что разрешенные энергии идут «полосами». Например, разрешены энергии от A до B , но затем не разрешено ничего вплоть до C , после чего разрешены энергии от C до D и т. д. То, что в цепь объединено много атомов, значит, что в каждой полосе существует очень много разрешенных энергий. Собственно, их так много, что можно предположить: в типичном твердом теле разрешенные энергии образуют континуум в каждой полосе. Эта черта нашей модели сохраняется и в реальном твердом теле: электроны действительно обладают энергиями, сгруппированными в подобные полосы, и это обуславливает важные особенности твердых тел. В частности, эти полосы объясняют, почему некоторые материалы (металлы) проводят электричество, а другие (изоляторы) не проводят.

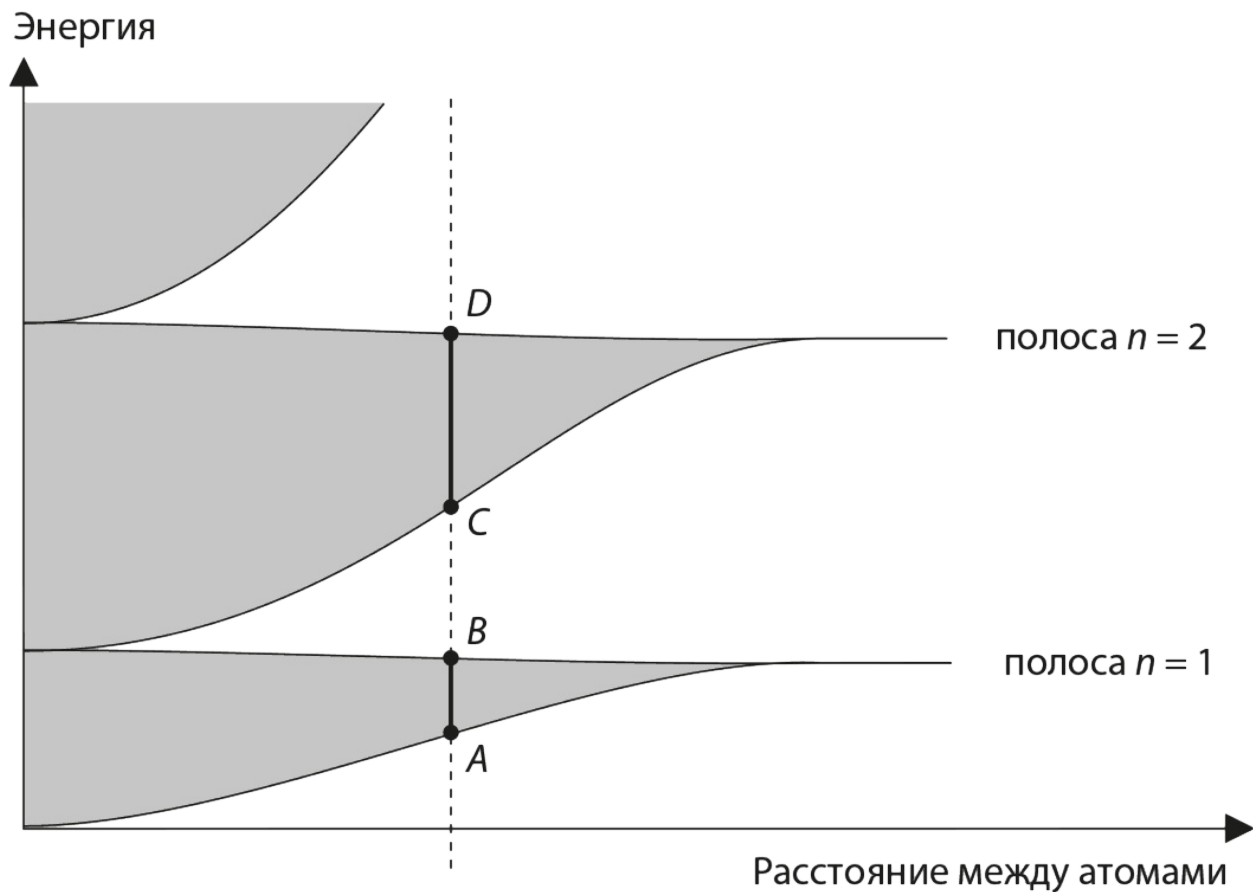


Рис. 8.6. Энергетические полосы в твердом теле и их варьирование на расстоянии между атомами

Почему так? Начнем с анализа цепи атомов (как обычно, моделируемой как цепь потенциальных ям), но предположим на сей раз, что в каждом атоме несколько электронов. Разумеется, это нормальное явление – только у водорода всего один электрон связан с одним протоном, так что мы переходим от обсуждения цепочки атомов водорода к более интересному случаю цепочки атомов потяжелее. Нужно вспомнить также о том, что существует два типа электронов – со спином вверх и со спином вниз, а принцип Паули гласит, что мы можем поместить на каждый разрешенный энергетический уровень не более двух электронов. Отсюда следует, что для цепи атомов, каждый из которых содержит всего один электрон (то есть это атомы водорода), энергетическая полоса $n = 1$ заполнена наполовину. Это показано на рис. 8.7, где мы изобразили энергетические уровни для цепи из пяти атомов. Это значит, что каждая полоса содержит пять отчетливо выделяемых разрешенных энергий. Эти пять энергетических состояний могут принять максимум десять

электронов, но нам стоит беспокоиться лишь о пяти, так как в конфигурации с самой низкой энергией цепь атомов содержит пять электронов, занимающих нижнюю половину энергетической полосы $n = 1$. Если бы у нас в цепи было 100 атомов, то полоса $n = 1$ могла бы содержать 200 электронов, но в случае с водородом будет только 100 электронов, так что полоса $n = 1$ в конфигурации с самой низкой энергией вновь заполнится наполовину. Рис. 8.7 показывает также, что происходит в том случае, когда на атом приходится два электрона (гелий) или три (литий). В случае с гелием конфигурация с самой низкой энергией соответствует заполненной полосе $n = 1$, а в случае с литием – заполненной полосе $n = 1$ и наполовину заполненной полосе $n = 2$. Должно быть понятно, что такая схема полного и половинного заполнения будет продолжаться, так что атомы с четным числом электронов всегда будут иметь заполненные полосы, а атомы с нечетным – наполовину заполненные полосы. Степень заполнения полосы, как мы очень скоро выясним, и служит причиной того, почему некоторые материалы оказываются проводниками, а другие – изоляторами.

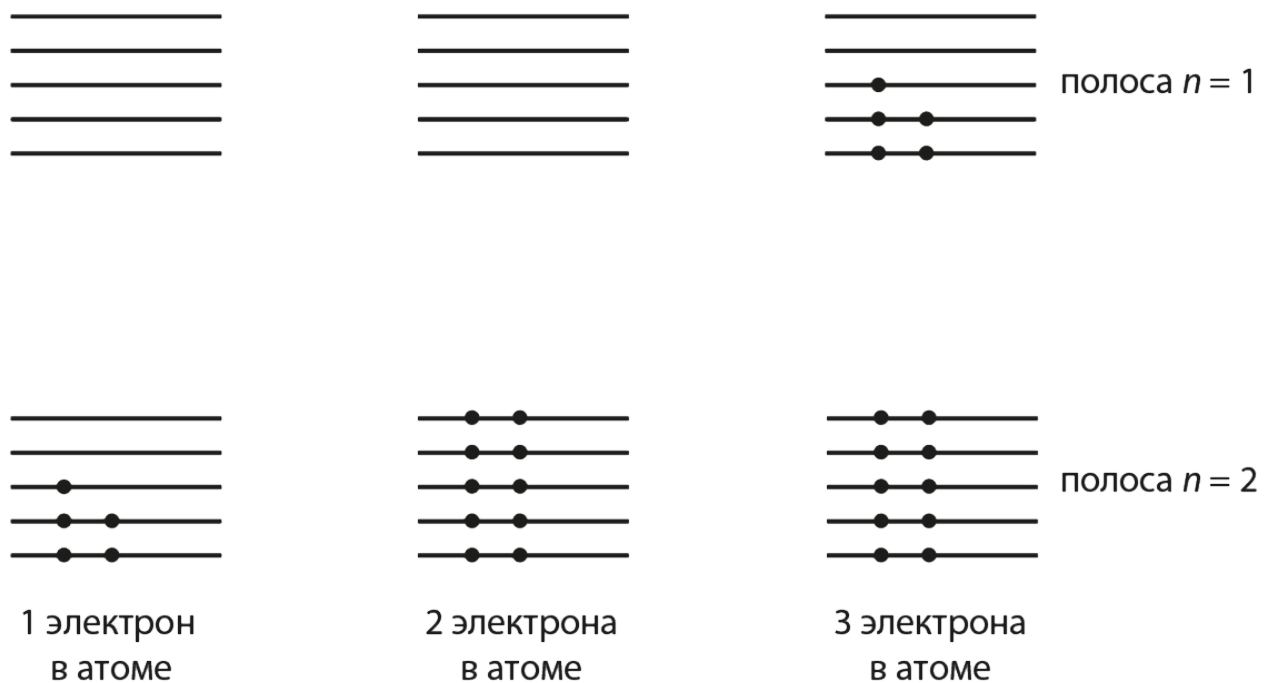


Рис. 8.7. Расположение электронов в самых низких доступных энергетических состояниях в цепочке из пяти атомов, где каждый атом содержит 1, 2 или 3 электрона. Черные точки обозначают электроны

Сейчас представим, что мы подсоединяем концы атомной цепочки к клеммам батареи. По опыту известно, что, если речь идет об атомах

металла, электрический ток будет проводиться. Но что это значит и как это объясняется тем, что мы уже знаем?

Точное действие батареи на атомы внутри провода, к счастью, понимать не надо. Все, что нужно знать, – это что подсоединение к батарее дает источник энергии, способный подтолкнуть электрон, причем всегда в одном и том же направлении. Почему батарея ведет себя именно так? Хороший вопрос. Дело в том, что она создает внутри провода электрическое поле, которое и подталкивает электроны. Это не самое удовлетворительное объяснение, но в пределах книги оно нас вполне устроит. В конце концов, мы могли бы обратиться к законам квантовой электродинамики и попытаться объяснить это явление через взаимодействие электронов с фотонами. Но при этом к разговору, который мы ведем сейчас, не добавилось бы ровным счетом ничего, так что в интересах краткости мы этого не сделаем.

Представьте электрон, находящийся в одном из состояний с определенной энергией. Начнем с предположения, что действие батареи лишь незначительно подталкивает электроны. Если электрон находится в состоянии низкой энергии и многие другие электроны стоят выше его на энергетической лестнице (используя этот образ, мы держим в уме рис. 8.7), он не сможет получить энергетический толчок от батареи. Его заблокируют, потому что более высокие энергетические состояния уже заполнены. Например, батарея способна вытолкнуть электрон на энергетическое состояние несколькими ступеньками выше, но, если все доступные ступеньки уже заняты, наш электрон должен отказаться от получения дополнительной энергии, поскольку двигаться просто некуда. Помните, что принцип Паули говорит о том, что, если все места заняты, дополнительные электроны не смогут попасть выше. Электрон вынужден вести себя так же, как если бы никакой батареи просто не существовало. Иная ситуация с электронами, имеющими самые высокие энергии. Они находятся близко к верху и могут в принципе впитать небольшой энергетический толчок от батареи и перейти на более высокое состояние – но только если не располагаются на самом верху уже заполненной полосы. Вернувшись к рис. 8.7, увидим, что электроны с самой высокой энергией смогут впитать энергию от батареи, если атомы в цепи содержат нечетное число электронов. Если это число четное, то верхние электроны все равно не смогут никуда сдвинуться, потому что в энергетической лестнице наблюдается большой разрыв, преодолеваемый только с помощью очень сильного толчка.

Отсюда следует, что если атомы твердого тела содержат четное число

электронов, то эти электроны могут вести себя так же, как если бы к ним не подключали никакой батареи. Ток просто не потечет, потому что электроны не смогут впитать энергию. Это описание изолятора. Единственное исключение – если разрыв между верхней частью самой высокой заполненной энергетической полосы и нижней частью следующей пустой полосы достаточно невелик, и очень скоро нам придется рассмотреть этот случай более подробно. Напротив, если атомы содержат четное число электронов, то верхние электроны всегда будут способны впитывать энергетический толчок батареи. В результате они перескакивают на более высокий энергетический уровень, и, поскольку толчок всегда происходит в одном и том же направлении, в итоге вызывается движение этих мобильных электронов, которое мы и определяем как электрический ток. Очень упрощенно мы можем, таким образом, сделать вывод: если твердое тело состоит из атомов, содержащих нечетное число электронов, оно должно стать электрическим проводником.

К счастью, реальный мир не настолько прост. Так, алмаз – кристаллическое твердое тело, полностью состоящее из атомов углерода, которые содержат шесть электронов, – оказывается изолятором. Графит же, тоже полностью состоящий из углерода, – проводник. Более того, на деле выходит, что правило четного и нечетного числа электронов редко работает. Просто наша модель линий из ям слишком рудиментарна. А вот что совершенно верно, так это то, что хорошие проводники электричества характеризуются возможностью электронов с самой высокой энергией перескакивать в состояния с более высокой энергией, в то время как свойства изоляторов обусловлены тем, что доступ их самых верхних электронов на более высокий уровень блокируется разрывом в лестнице разрешенных энергий.

История эта обретает новый поворот, и именно он объяснит нам в следующей главе, как полупроводники проводят ток. Представьте себе электрон, который может свободно двигаться по незаполненной полосе идеального кристалла. Мы выбрали кристалл, чтобы установить, что химические связи (возможно, ковалентные) способствуют регулярной организации атомов.

Наша одномерная модель твердого тела соответствует кристаллу, если все ямы равноудалены друг от друга и имеют одинаковый размер. Подсоедините батарею – и электрон с радостью перепрыгнет с одного уровня на другой после того, как его слегка подтолкнет приложенное электрическое поле. В результате электрический ток будет постоянно расти, поскольку электроны будут впитывать все больше энергии и двигаться все

быстрее и быстрее. Для каждого, кто хоть как-то знаком с электричеством, это утверждение должно звучать странно, потому что никакого закона Ома не наблюдается (напомним: ток I зависит от приложенного напряжения U согласно формуле $U = I \times R$, где R – сопротивление цепи). Закон Ома возникает, потому что электроны, перескакивая вверх по энергетической лестнице, могут терять энергию и возвращаться в прежнее состояние; это может произойти, только если атомная решетка не идеальна – либо из-за примесей (то есть случайных атомов, отличающихся от большинства), либо из-за того, что атомы совершают значительные движения, а это гарантированно происходит при любой отличающейся от нуля температуре. В результате электроны большую часть времени играют в «змеи и лестницы» на микроуровне: они взбираются по энергетической лестнице, только чтобы снова упасть в результате взаимодействий с несовершенной атомной решеткой. В среднем получается *типичная энергия электрона*, что ведет к постоянству тока. Эта типичная энергия электрона определяет скорость течения электронов по проводу – того, что мы называем электрическим током. Сопротивление провода – мера того, насколько несовершенна атомная решетка, через которую идут электроны.

Но это не такой уж крутой поворот. Даже без закона Ома ток не нарастал бы равномерно. Когда электроны достигают верхней части полосы, они начинают вести себя очень странно, и в результате такого поведения ток начинает уменьшаться, а со временем разворачивается в другую сторону. И это очень странно: даже несмотря на то, что электрическое поле подталкивает электроны в одном направлении, они, достигнув верха энергетической полосы, текут вспять. Объяснение этого удивительного эффекта лежит за пределами нашей книги, а пока достаточно сказать, что ключевую роль здесь играют положительно заряженные ядра: они так толкают электроны, что те меняют направление.

Итак, как и было заявлено ранее, мы рассмотрим, что происходит, когда потенциальный изолятор ведет себя как проводник, потому что разрыв между последней заполненной полосой и следующей, пустой полосой «достаточно мал». На этой стадии стоит познакомиться с научным жаргоном. Последняя (то есть самая высокая) энергетическая полоса, заполненная электронами без свободных мест, называется *валентной зоной*, а следующая полоса (в нашем анализе – пустая или наполовину заполненная) – *зоной проводимости*. Если валентная зона и зона проводимости перекрываются (а это вполне возможно), то никакого разрыва не наблюдается и потенциальный изолятор начинает вести себя как проводник. А что если разрыв есть, но при этом он «достаточно мал»?

Мы указали, что электроны могут получать энергию от батареи, так что можно предположить: если батарея достаточно мощная, она может дать довольно мощный толчок для перехода электрона вблизи от верха валентной зоны в зону проводимости. Это возможно, но мы не будем рассматривать такие случаи, потому что обычные батареи не способны создать достаточно мощный энергетический толчок. Добавим цифр: электрическое поле в твердом теле обычно имеет порядок нескольких вольт на метр, а нам, чтобы подтолкнуть электрон к скачку на электронвольт ^[41] из валентной зоны к зоне проводимости в типичном изоляторе, понадобятся поля нескольких вольт на нанометр (то есть в миллиард раз сильнее). Значительно больше нас интересует толчок, который электрон может получить от атомов, составляющих твердое тело. Они не сидят неподвижно на одном и том же месте, немного раскачиваются, и чем горячее твердое тело, тем сильнее они раскачиваются. Качающийся атом может сообщить электрону гораздо больше энергии, чем обычная батарея – достаточно, чтобы энергия атома подскочила на несколько электронвольт. При комнатной температуре, впрочем, электрон довольно редко получает подобный толчок, поскольку при 20 °С тепловая энергия составляет примерно 1/40 электронвольт. Но это лишь средний показатель, а в твердом теле очень много атомов, поэтому такое периодически случается. В этом случае электроны могут бежать из тюрьмы зоны валентности и перейти в зону проводимости, где впитать легкие энергетические толчки от батареи и вызвать электрический ток.

Материалы, в которых при комнатной температуре достаточное количество электронов можно перевести из валентной зоны в зону проводимости, имеют собственное название: это *полупроводники*.

При комнатной температуре они могут проводить электрический ток, но, когда они охлаждаются и их атомы раскачиваются меньше, способность проводить электричество снижается, и они снова превращаются в изоляторы. Два классических примера полупроводников – кремний и германий, и благодаря своей двойственной натуре они могут использоваться с большой выгодой. На самом деле не будет преувеличением сказать, что технологическое применение полупроводниковых материалов произвело в мире революцию.

9. Современный мир

В 1947 году был создан первый в мире транзистор. В наши дни ежегодно производится более 10 000 000 000 000 000 000 транзисторов, что во 100 раз больше, чем число рисовых зерен, поглощаемых ежегодно семью миллиардами жителей Земли. Первый в мире транзисторный компьютер был собран в 1953 году в Манчестере и содержал 92 транзистора. Сегодня можно купить более 100 000 транзисторов по цене рисового зернышка, а в вашем мобильном телефоне их около миллиарда. В этой главе мы опишем работу транзистора, которую, безусловно, можно считать самым важным приложением квантовой теории.

Как мы уже видели в предыдущей главе, проводник потому и проводник, что некоторые электроны располагаются в зоне проводимости. По этой причине они довольно мобильны и могут «перетекать» по проводу, когда подсоединяется батарея. Уместна аналогия с текущей водой; батарея заставляет ток течь. Для иллюстрации идеи можно воспользоваться даже концепцией «потенциала»: батарея создает потенциал, внутри которого движутся электроны зоны проводимости, и потенциал в каком-то смысле создает «склон». По этому склону в зоне проводимости материала электрон «скатывается», обретая при движении энергию. Это другой способ представления небольших толчков, о которых мы говорили в прошлой главе, при котором не батарея толкает электрон с ускорением по проводу, а образуется что-то вроде падения воды с холма. Это хороший вариант визуализации проводимости электричества электронами, им мы и будем пользоваться до конца этой главы. В полупроводниках, таких как кремний, происходит нечто очень интересное: ток переносится не только электронами в зоне проводимости. Электроны в валентной зоне тоже вносят свой вклад. Посмотрите на рис. 9.1. Стрелка показывает, как электрон, изначально инертно покоящийся в зоне валентности, поглощает некоторое количество энергии и переходит в зону проводимости.

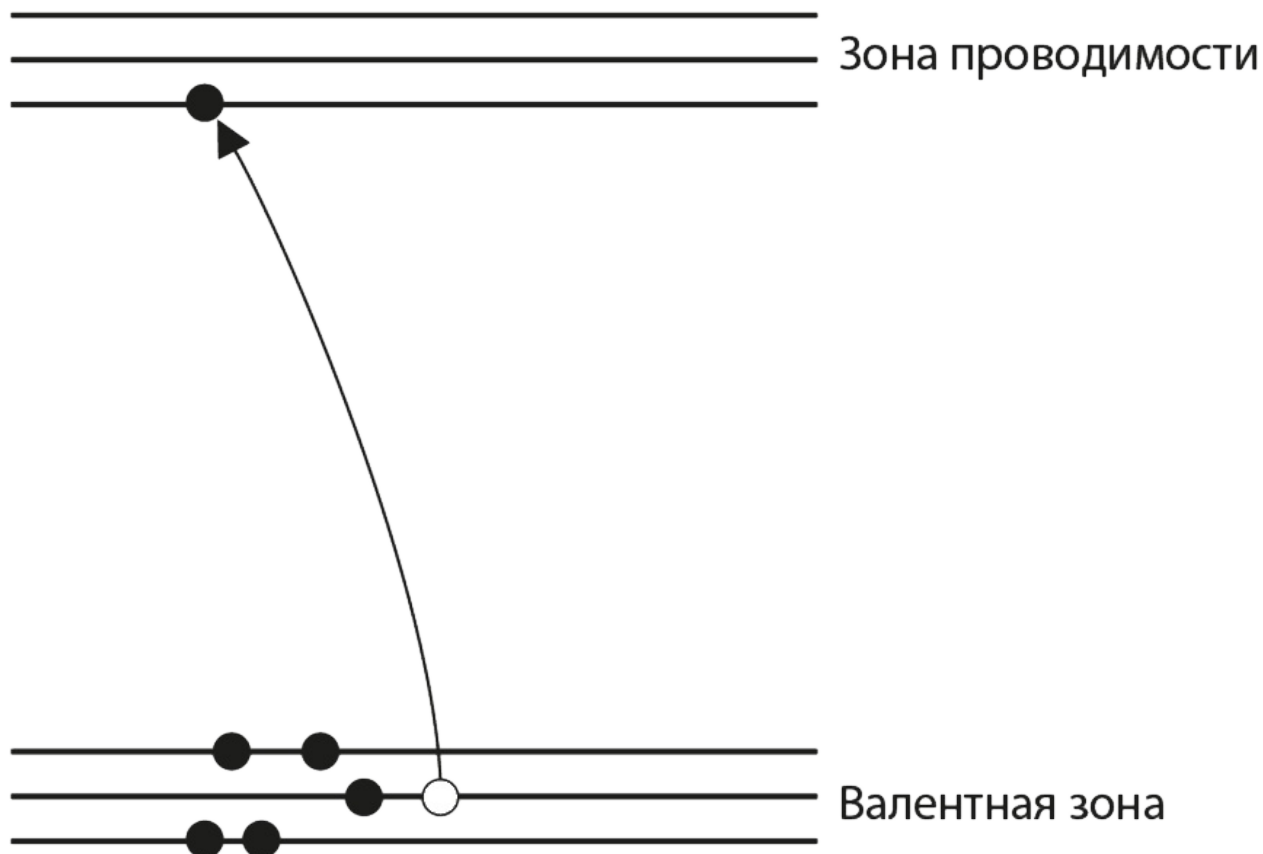


Рис. 9.1. Пара электрон-дырка в полупроводнике

Конечно, после этого электрон становится гораздо более мобильным, но мобильность обретает и еще кое-что: в зоне валентности образуется дырка, и она дает возможность маневра электронам из зоны валентности, до того столь же инертным. Как мы могли видеть, подсоединение батареи к этому полупроводнику заставит электрон из зоны проводимости совершить энергетический скачок, вызвав тем самым движение электрического тока. Что случится с этой дыркой? Электрическое поле, созданное батареей, может заставить электрон, находящийся в валентной зоне в каком-то более низком энергетическом состоянии, перепрыгнуть в эту свободную дырку. Теперь дырка заполнена, но появляется дырка «глубже» – на более низком энергетическом уровне в валентной зоне. Когда электроны в валентной зоне перескакивают в свободную дырку, та возвращается. Вместо того чтобы отслеживать движение всех электронов в почти заполненной валентной зоне, мы можем отслеживать местоположение дырки, забыв об электронах. Такой оптимизацией подсчета привычно пользуются специалисты по физике полупроводников. Нам она тоже облегчит жизнь.

Приложенное электрическое поле приводит в движение электроны зоны проводимости, создавая ток, и нам хотелось бы знать, что происходит в этом случае с дырками в валентной зоне. Мы знаем, что электроны валентной зоны не могут двигаться, поскольку их почти полностью сдерживает принцип Паули, но под действием электрического поля они чуть сдвигаются, и дырка двигается наряду с ними. Наверное, это противоречит интуиции, так что, если вы не можете смириться с тем, что когда электроны в валентной зоне смещаются влево, то и дырка тоже смещается влево, рассмотрите следующую аналогию. Представьте обычную очередь. Расстояние между людьми составляет 1 метр, но где-то в середине очереди одного человека не хватает. Эти люди – аналог электронов, а отсутствующий человек – аналог дырки. Теперь вообразите, что все эти люди продвинулись на метр вперед, так что каждый из них оказался там, где до него стоял идущий перед ним в очереди. Очевидно, что брешь в очереди тоже продвигается на метр. Так ведут себя и дырки. Кроме этого, можно представить, как вода течет по трубе: пузырек воды будет двигаться в том же направлении, что и струя, и эта «отсутствующая вода» соответствует дырке в валентной зоне.

Но тут, как будто было недостаточно всего остального, появляется дополнительное важное осложнение: мы должны обратиться к той области физики, которая была введена в «неожиданном повороте» в конце предыдущей главы.

Как вы помните, электроны, движущиеся в верхней части заполненной энергетической полосы, получают ускорение от электрического поля в *обратную* сторону относительно электронов, движущихся в нижней части той же полосы. Это значит, что дырки, которые находятся вверху валентной зоны, двигаются в противоположном направлении по отношению к электронам, находящимся в нижней части зоны проводимости.

Результат таков: мы можем изобразить поток электронов в одном направлении и соответствующий ему поток дырок в другом. Можно считать, что дырка имеет электрический заряд, прямо противоположный заряду электрона. Вспомните, что материал, через который текут наши электроны и дырки, в среднем электрически нейтральный. В любой отдельно взятой области материал не имеет заряда, потому что отрицательный заряд электронов отменяет положительный заряд, переносимый атомными ядрами. Но если мы создадим пару электрон-дырка, переместив электрон из валентной зоны в зону проводимости (так, как мы уже описали), образуется свободно движущийся электрон, который

создает избыток отрицательного заряда по сравнению с обычными условиями в этой области материала. Точно так же дырка – это отсутствие электрона, и в месте, где она есть, преобладает положительный заряд. Электрический ток по определению оказывается величиной, с которой движутся положительные заряды, так что электроны вносят в ток отрицательный вклад^[42], а дырки – положительный, если движутся в одном и том же направлении. Если, как в случае с нашим полупроводником, электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, то они складываются, в итоге получается большой заряд и, следовательно, большая сила тока.

Хотя все это кажется довольно запутанным, результаты ясны как день: мы должны представить, что течение электричества через полупроводник – это течение заряда, а он состоит из электронов в зоне проводимости, движущихся в одном направлении, и дырок в валентной зоне, движущихся в обратную сторону. Эта ситуация отличается от движения тока в проводнике, когда сила тока определяется движением огромного количества электронов в зоне проводимости, а дополнительная сила тока, создаваемая при образовании пар электрон-дырка, пренебрежимо мала. Понять пользу полупроводников – значит осознать, что ток, идущий по полупроводнику, нельзя назвать неконтролируемым движением электронов по проводу, как в проводнике. Это гораздо более сложная комбинация движений электронов и дырок, которая при должной настройке может быть использована для создания микроскопических устройств, способных обеспечить полный контроль за движением тока по цепи.

Следующее изложение – вдохновляющий пример прикладной физики и техники. Идея в том, чтобы сознательно загрязнить кусок чистого кремния или германия для создания некоторых новых доступных энергетических уровней электронов. Эти новые уровни позволяют контролировать поток электронов и дырок, идущий через полупроводник, как мы можем с помощью клапанов контролировать движение воды по трубам. Конечно, контролировать ток, идущий по проводу, в принципе легко: достаточно дернуть рубильник. Но мы сейчас не об этом, а о том, как создать более тонкие переключатели и динамически контролировать с их помощью ток в цепи. Эти переключатели – строительные кирпичики логических схем, а из логических схем, в свою очередь, состоят микропроцессоры. Итак, как же все это работает?

Левая часть рис. 9.2 показывает, что происходит, если кусок кремния загрязнен фосфором. Уровень загрязнения можно точно контролировать, что очень важно. Представьте, что в кристалле чистого кремния каждый

атом последовательно замещается атомом фосфора. Атом фосфора попадает на место, освобожденное атомом кремния, и единственная разница состоит в том, что у фосфора на один электрон больше, чем у кремния. Этот лишний электрон очень слабо, но связан со своим атомом, он не до конца свободен и занимает энергетический уровень, находящийся сразу под зоной проводимости. При низких температурах зона проводимости пуста, и лишние электроны, появляющиеся из атомов фосфора, располагаются на донорном энергетическом уровне, отмеченном на рисунке.

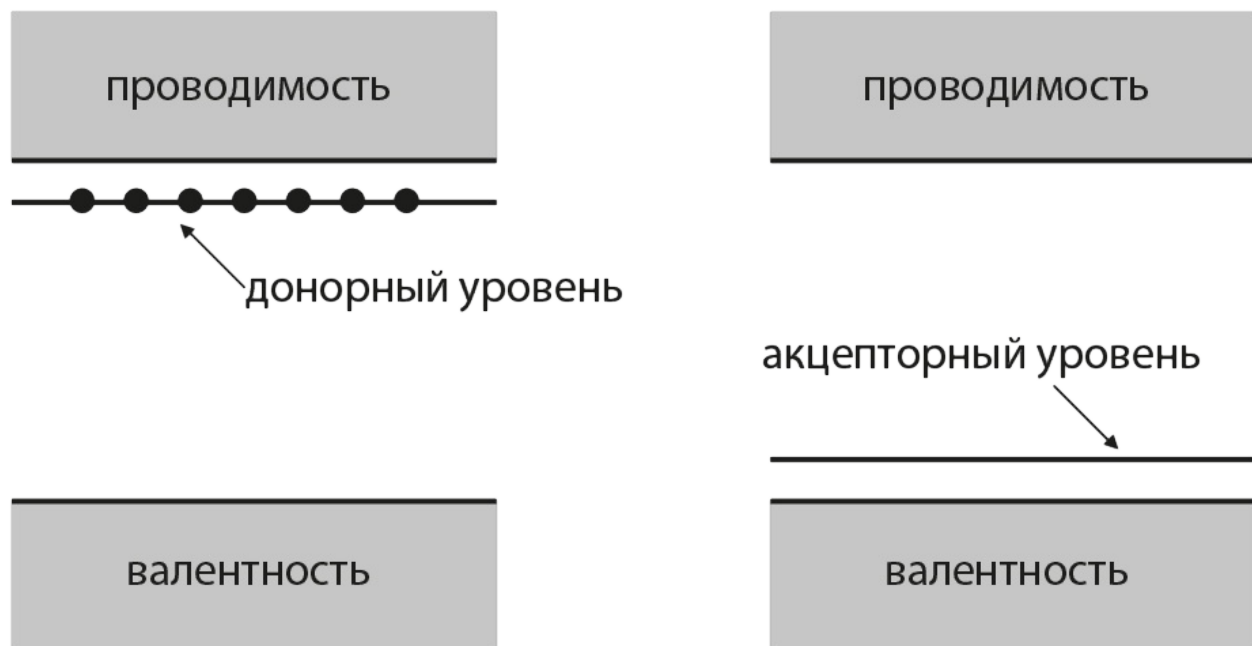


Рис. 9.2. Новые энергетические уровни, появившиеся в полупроводнике *n*-типа (слева) и полупроводнике *p*-типа (справа)

При комнатной температуре пара электрон-дырка в кремнии создается очень редко. Лишь один из примерно триллиона электронов получает достаточно энергии от термических колебаний решетки, чтобы перескочить из валентной зоны в зону проводимости. Напротив, поскольку донорный электрон в фосфоре очень слабо связан с атомом, велика вероятность, что он сможет совершить небольшой скачок с донорного уровня в зону проводимости. Итак, при комнатной температуре при уровне загрязнения выше чем один атом фосфора на триллион атомов кремния, в зоне проводимости будут преимущественно присутствовать электроны, освобожденные атомами фосфора. Это значит, что можно с очень высокой точностью контролировать присутствие мобильных электронов, которые

способны проводить электричество, просто варьируя степень фосфорного загрязнения. Поскольку ток в этом случае переносят электроны, свободно движущиеся в полосе проводимости, мы говорим, что такой тип загрязненного кремния называется *n*-типом (от слова negative – отрицательный).

Правая часть рис. 9.2 показывает, что происходит, если вместо фосфора мы загрязняем кремний атомами алюминия. Атомы алюминия вновь располагаются среди атомов кремния и прекрасно замещают их. Разница в том, что у алюминия на один электрон меньше, чем у кремния. Так в чистом кристалле появляются дырки, в то время как при фосфорном загрязнении появлялись лишние электроны. Эти дырки расположены вблизи от атомов алюминия, и их можно заполнить электронами, которые перескакивают из валентной зоны соседних атомов кремния. «Дырчатый» акцепторный уровень показан на рисунке. Он располагается прямо над валентной зоной, потому что электрон из атома кремния в валентной зоне может легко перескочить в дырку, оставленную атомом алюминия. В этом случае естественно считать, что электрический ток переносится дырками, поэтому такой тип загрязненного кремния называется *p*-типом (от слова positive – положительный). Как и в предыдущем случае, при комнатной температуре уровень алюминиевого загрязнения может быть не более одной триллионной, прежде чем благодаря движению дырок из алюминия пойдет ток.

Итак, мы пока просто доказали, что можно сделать такой кусок кремния, который будет проводить ток – дав возможность либо электронам из атомов фосфора двигаться в зоне проводимости, либо дыркам из атомов алюминия двигаться в валентной зоне. Ну и что?

На рис. 9.3 показано, что мы на пути к чему-то важному: он демонстрирует, что происходит, если сложить вместе два куска кремния – один *n*-типа и один *p*-типа. Изначально в области *n*-типа движутся электроны из фосфора, а в области *p*-типа – электроны из алюминия.

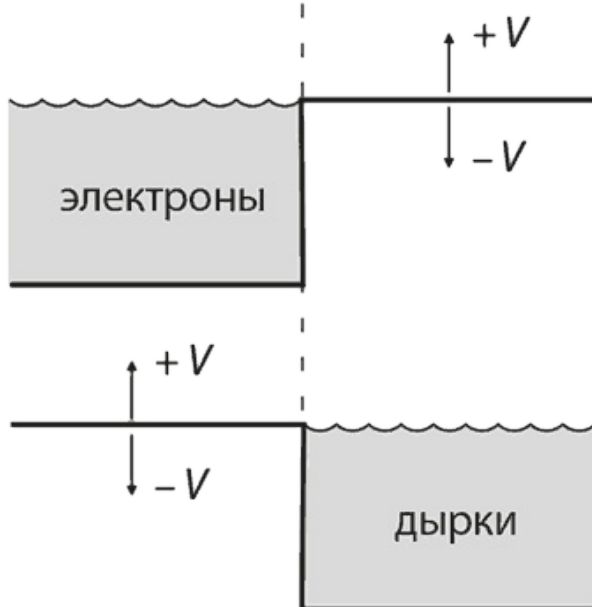
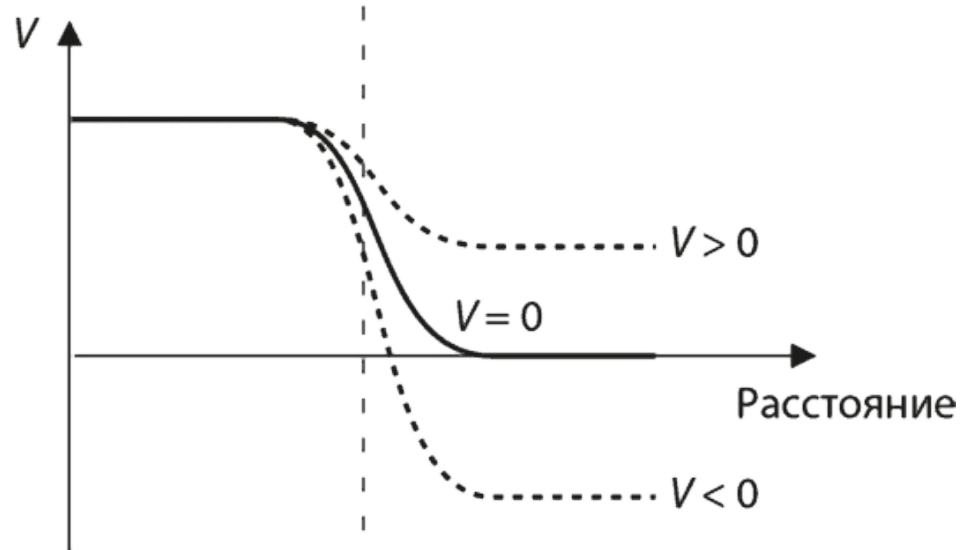
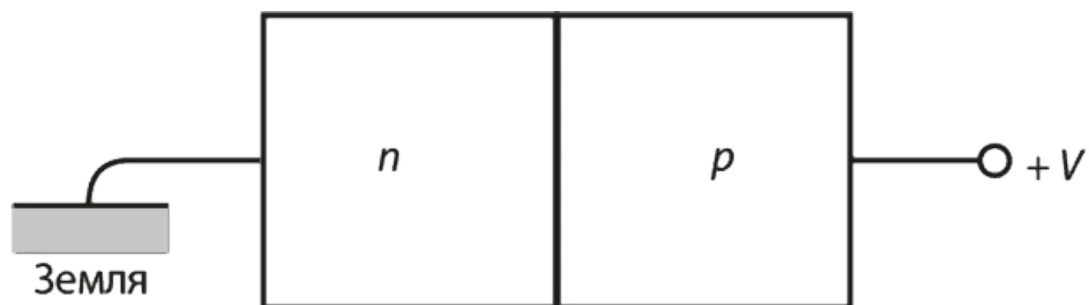


Рис. 9.3. Соединение двух кусков кремния – n -типа и p -типа

В итоге электроны из области n -типа перетекают в область p -типа, а электроны из области p -типа – в область n -типа. В этом нет никакой загадки; электроны и дырки змеятся по сочленению двух материалов, как капля чернил растворяется в ванне с водой. Но поскольку электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, они оставляют за собой области положительного заряда (в области n -типа) и области отрицательного заряда (в области p -типа). Такое расположение зарядов препятствует дальнейшей миграции по правилу «одноименные заряды отталкиваются», со временем наступает баланс и миграция заканчивается.

На второй иллюстрации рис. 9.3 показано, как можно описать это явление на языке потенциалов. Демонстрируется, как электрический потенциал изменяется по всему сочленению. В глубине области n -типа эффект сочленения мал, и поскольку наступило состояние равновесия, ток отсутствует. Значит, в этой области потенциал постоянен. Прежде чем двигаться дальше, надо еще раз разъяснить, почему нам важен потенциал: он просто показывает, какие силы действуют на электроны и дырки. Если потенциал ровный, электрон не будет двигаться, как не двигается мяч, лежащий на ровном полу.

Если потенциал уходит вниз, можно предположить, что электрон, находящийся вблизи этого падающего потенциала, будет тоже «катиться вниз». К сожалению, принято довольно неудобное решение считать, что снижение потенциала означает «повышение» электрона, то есть электроны потекут вверх. Иными словами, падающий потенциал служит для электрона барьером, что мы и изобразили на рисунке. Это сила, подталкивающая электрон прочь от области p -типа, как следствие создания отрицательного заряда благодаря произошедшей ранее миграции электронов. Эта сила предотвращает дальнейшее движение электронов из кремния n -типа в кремний p -типа. Использование снижения потенциала для иллюстрации восхождения электрона на самом деле не так глупо, как кажется, потому что сейчас большая наглядность достигается для дырок, так как они естественным образом текут вниз. Можно считать, что наш способ представления потенциала (движущегося с высокой точки слева до низкой точки справа) корректно описывает и тот факт, что падение потенциала не позволяет дыркам покинуть область p -типа.

Третья иллюстрация на рисунке – аналогия с текущей водой. Электроны слева готовы и намерены потечь вниз по проводу, но барьер мешает им сделать это. Точно так же дырки в области p -типа скапливаются

не с той стороны барьера; водяной барьер и падение потенциала – два разных способа представления одного и того же. Так обстоят дела, если просто скрепить вместе два куска кремния – n -типа и p -типа. Однако их скрепление требует несколько больших усилий, чем можно предположить: их нельзя просто склеить, потому что такое сочленение не позволит электронам и дыркам свободно перетекать из одной области в другую.

Самое интересное, если подключить этот pn -переход к батарее, это позволит повышать или понижать потенциальный барьер между областями n -типа и p -типа. Если понизить потенциал области p -типа, то он упадет еще сильнее, так что электронам и дыркам станет еще сложнее двигаться по сочленению. Но повышение потенциала области p -типа (или ослабление потенциала области n -типа) подобно понижению плотины, сдерживающей воду. Электроны области n -типа немедленно начинают затоплять область p -типа, а дырки движутся столь же массово, но в противоположном направлении. Таким образом pn -переход может использоваться как диод: он может обеспечить движение тока, правда, только в одном направлении^[43]. Но диоды не главный предмет нашего интереса.

Рис. 9.4 – это набросок устройства, изменившего мир, – транзистора. Он показывает, что произойдет, если сделать своеобразный сэндвич – слой кремния p -типа разместить между двумя слоями кремния n -типа. Здесь нам хорошую службу сослужит объяснение про диод, потому что идеи примерно те же самые. Электроны движутся из областей n -типа в области p -типа, а дырки движутся в обратном направлении, пока из-за падений потенциала в сочленениях между слоями такое взаимопроникновение не прекращается. В изолированном виде можно представить себе существование двух резервуаров электронов, разделенных барьером, и один резервуар дырок, зажатый между ними.

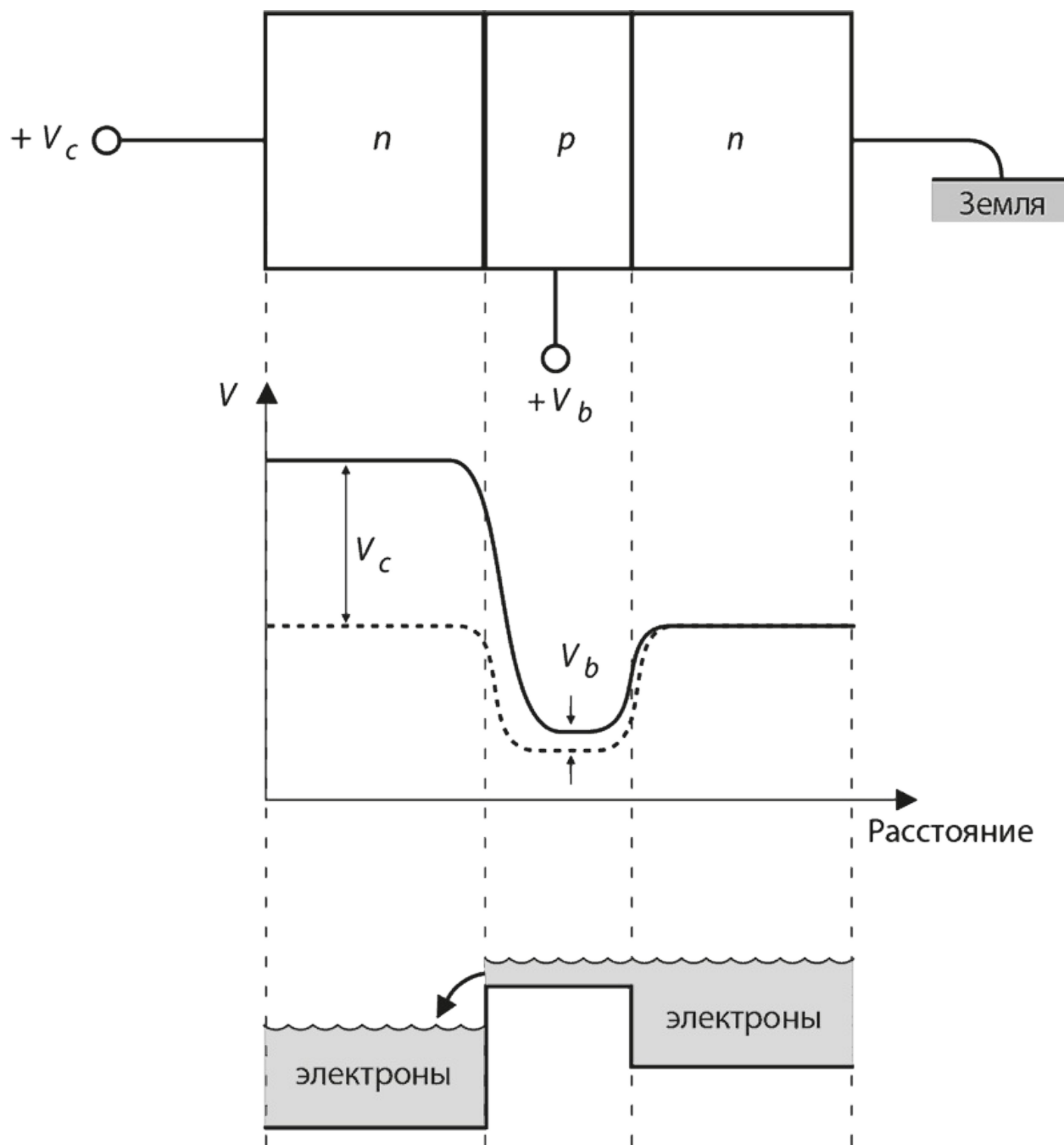


Рис. 9.4. Транзистор

Самое интересное происходит, когда мы прикладываем напряжение к области n -типа с одной стороны и к области p -типа в середине. Приложение положительного напряжения заставляет подняться плоскую часть кривой слева (на величину V_c) и плоский участок в области p -типа (на величину V_b). Это показано сплошной линией на центральной диаграмме. Такой способ расположения потенциалов имеет серьезные

последствия: создается настоящий водопад электронов, которые преодолевают сниженный центральный барьер и направляются в область n -типа слева (напомним, что электроны текут «в горку»). Если V_c больше, чем V_b , то поток электронов будет односторонним и электроны слева не смогут преодолеть область p -типа. Как бы безобидно ни звучали эти фразы, но мы только что описали электронный клапан. Итак, посредством применения напряжения к области p -типа мы можем включать и выключать электрический ток.

И вот завершение: мы готовы к полному осознанию потенциала скромного транзистора. На рис. 9.5 снова демонстрируем действие транзистора через параллели с текущей водой. Ситуация «закрытого клапана» полностью аналогична тому, что происходит в области p -типа без всякого напряжения. Применение напряжения соответствует открытию клапана. Под двумя трубками мы изобразили символ, который обычно используется для транзистора, и с известной долей воображения можно утверждать, что он даже похож на клапан.

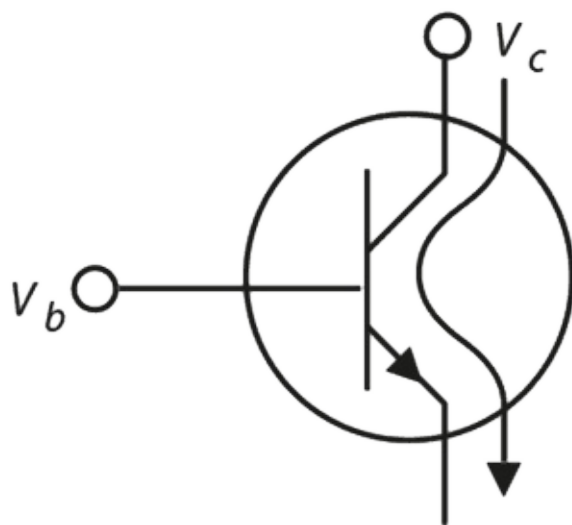
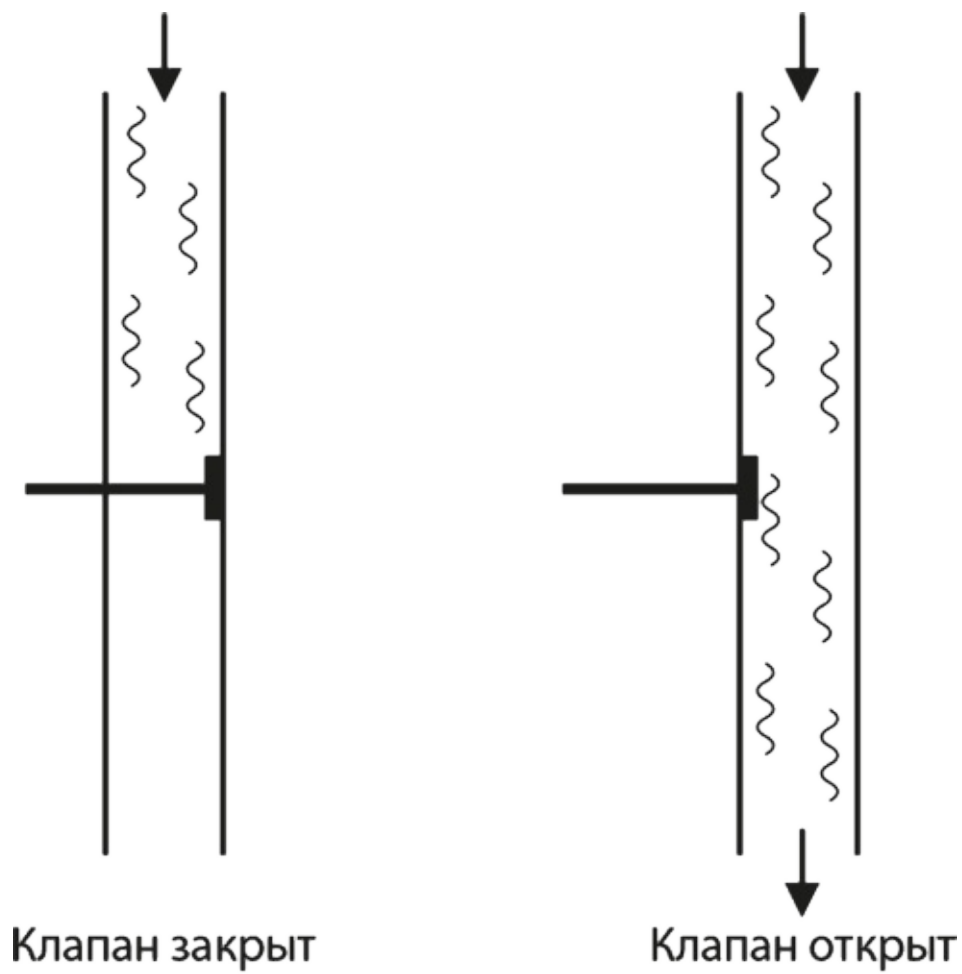


Рис. 9.5. Аналогия транзистора с водяными трубками

Что можно сделать с клапанами и трубками? Мы можем создать

компьютер, а если трубки и клапаны достаточно малы, то вполне серьезный компьютер.

Рис. 9.6 представляет собой концептуальную иллюстрацию того, как можно использовать трубку с двумя клапанами и создать нечто под названием «логический вентиль». У трубки слева оба клапана открыты, в результате снизу вытекает вода. У трубки в центре и трубки справа один клапан открыт и один клапан закрыт, так что, очевидно, вода снизу не выливается. Мы решили не изображать четвертый вариант – когда оба клапана закрыты. Если обозначить вытекание воды из дна трубок цифрой 1, отсутствие такого вытекания – цифрой 0, а также назначить для открытого клапана цифру 1, а для закрытого цифру 0, то можно изобразить действие четырех трубок (трех нарисованных и одной ненарисованной) уравнениями $1 \text{ и } 1 = 1$, $1 \text{ и } 0 = 0$, $0 \text{ и } 1 = 0$ и $0 \text{ и } 0 = 0$. Слово «и» – логический оператор, который используется здесь в техническом смысле: система из трубки и клапанов, которую мы только что описали, называется «вентиль и». Этот вентиль разрешает два ввода (состояние двух клапанов) и возвращает единственное значение (течет вода или нет), при этом единственный способ получить на выходе 1 – это ввести оба раза 1. Надеемся, теперь понятно, как можно с помощью пары подсоединенных транзисторов сделать «вентиль и» – принципиальная схема дана на этом рисунке.

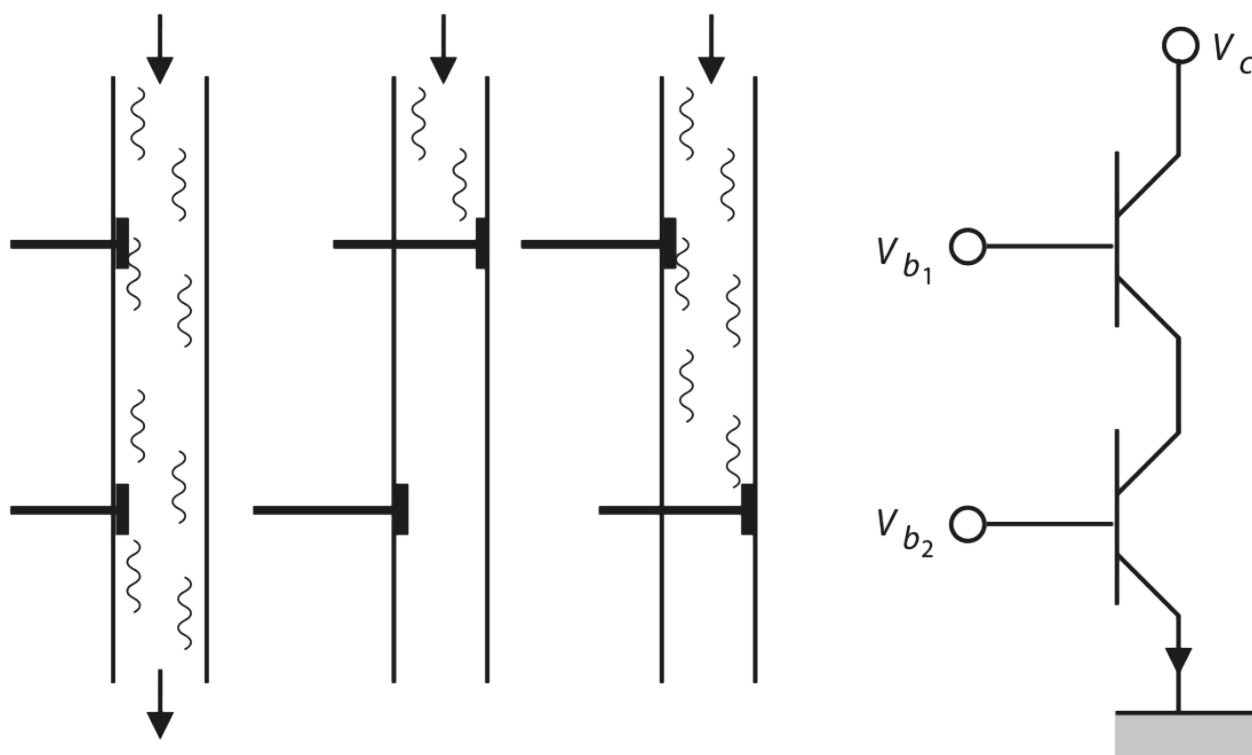


Рис. 9.6. «Вентиль **и**», созданный с помощью водяной трубы и двух клапанов (слева) и пары транзисторов (справа). Второй вариант гораздо лучше подходит для создания компьютеров

Мы видим, что ток начинает течь только в том случае, если оба транзистора включены (то есть если приложить положительное напряжение к областям p -типа, V_{b1} и V_{b2}), а именно это и приводит к появлению «вентиль **и**».

Другая логическая схема изображена на рис. 9.7. Здесь вода будет вытекать снизу, если открыт любой из клапанов, и не будет вытекать, если оба клапана закрыты. Это называется «вентилем **или**», и ее можно описать аналогично предыдущей: 1 **или** 1 = 1, 1 **или** 0 = 1, 0 **или** 1 = 1 и 0 **или** 0 = 0. Соответствующая схема транзистора тоже показана на рисунке. Ток пойдет во всех случаях, кроме того, когда оба транзистора выключены.

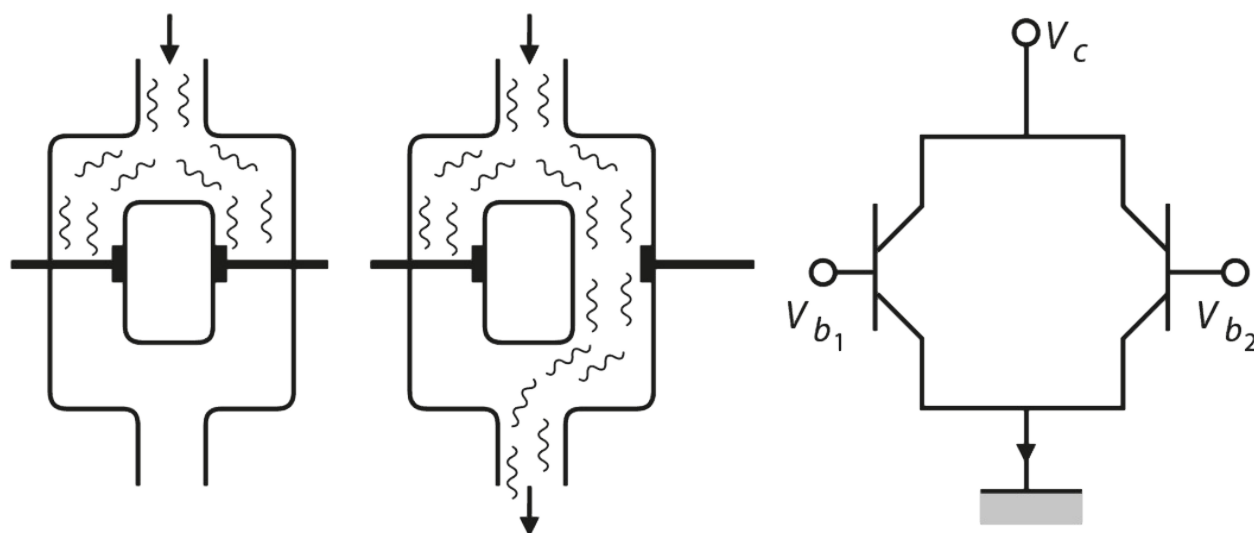


Рис. 9.7. «Вентиль **или**», созданный при помощи двух водяных труб и двух клапанов (слева) или пары транзисторов (справа)

Именно на таких логических схемах и основана сила цифровых электронных приборов. Эти скромные строительные кирпичики дают сочетания логических схем, которые можно использовать для создания сколь угодно сложных алгоритмов. Можно назначить список вводимых значений в некоторых логических цепях (набор нулей и единиц), прогнать эти значения через некую изощренную конфигурацию транзисторов и получить на выходе список других значений (другой набор нулей и единиц). Таким образом мы создаем цепи для совершения сложнейших математических расчетов или принятия решений, основанных на том, какие

клавиши нажимаются на клавиатуре. Затем мы снабжаем этой информацией устройство, которое выводит соответствующие символы на экран, или запускаем сигнал тревоги, если кто-то вламывается в дом, или посылаем поток текстовых символов по оптоволоконному кабелю (при этом они представлены в виде бинарного кода) на другой конец мира, или... да что угодно, потому что практически любой электронный прибор в нашем распоряжении под завязку набит транзисторами.

Потенциал их безграничен, и мы уже всюду используем транзисторы для изменения мира. Не будет преувеличением сказать, что транзистор – самое важное изобретение за последние 100 лет: современный мир построен на полупроводниковых технологиях и сформирован ими. С практической точки зрения эти технологии спасли миллионы жизней: в особенности стоит указать на применение вычислительных устройств в больницах, преимущества быстрых, надежных и распространенных по всему миру коммуникационных систем, использование компьютеров в научных исследованиях и для контролирования сложных промышленных производств.

Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в 1956 году получили Нобелевскую премию по физике «За исследование полупроводников и открытие транзисторного эффекта». Возможно, никогда Нобелевская премия не присуждалась за работу, которая бы в такой степени непосредственно затрагивала жизни огромного числа людей.

10. Взаимодействие

В первых главах мы рассказывали о законах, по которым движутся мельчайшие частицы. Они перескакивают с места на место, без стеснения исследуя пространство и метафорически перенося с собой свои микроскопические циферблаты. Добавив множество циферблатов, соответствующих разнообразным способам, которыми они могут прибыть в некую определенную точку в пространстве, мы получаем единый общий циферблат, размер которого свидетельствует о вероятности найти частицу «там». Из диких, анархических проявлений квантовых скачков появляются более известные нам свойства повседневных предметов. В каком-то смысле каждый электрон, каждый протон и каждый нейтрон, присутствующие в вашем теле, постоянно исследуют всю Вселенную, и только когда вычислена общая сумма всех этих исследований, мы оказываемся в мире, где атомы нашего тела, к счастью, стремятся находиться в относительно стабильной форме – по крайней мере, на век или больше. Но мы до сих пор никоим образом не касались природы взаимодействий между частицами. Мы ухитрились довольно далеко продвинуться, не касаясь вопроса о том, на каком языке частицы разговаривают друг с другом. Во многом помогла идея потенциала. Но что такое потенциал? Если мир состоит исключительно из частиц, то, разумеется, мы можем совсем отказаться от смутного представления, что частицы двигаются «в потенциале», созданном другими частицами, и говорить уже о том, как именно движутся частицы и как взаимодействуют.

Современный подход к фундаментальной физике, известный как квантовая теория поля, действительно устраняет это понятие, добавляя к законам движения частиц новые законы, которые объясняют, как эти частицы взаимодействуют друг с другом. Эти законы оказываются более сложными, чем те, с которыми мы уже встречались, и одно из чудес современной науки в том, что, несмотря на всю сложность и запутанность мира природы, законов этих не так уж много. Альберт Эйнштейн писал: «Вечная тайна мира – в его понятности», а то, что «он понятен, это настоящее чудо».

Начнем с формулировки законов первой открытой квантовой теории поля – *квантовой электродинамики*, сокращенно QED. Истоки этой теории восходят к 1920-м годам, когда Дираку с особым успехом удалось поставить электромагнитную теорию Максвелла на квантовые рельсы.

Мы уже много раз встречались в этой книге с квантами электромагнитного поля, а именно с фотонами, но в то время с новой теорией было связано много очевидных проблем, остававшихся неразрешимыми в 1920–1930-е годы. Как именно, например, электрон испускает фотон при движении между энергетическими уровнями в атоме? И что происходит с фотоном, когда он поглощается электроном, что позволяет электрону перепрыгнуть на более высокий энергетический уровень? Очевидно, что фотоны могут создаваться и разрушаться во внутриатомных процессах, и то, как это происходит, не описывается той «старомодной» квантовой теорией, с которой мы до сих пор имели дело в этой книге.

В истории науки есть несколько легендарных собраний ученых – встреч, кажется, определенно изменивших ход науки. Возможно, это немного не так, поскольку обычно участники таких встреч уже много лет работали над своими проблемами, но состоявшаяся в июне 1947 года конференция в Шелтер-Айленде, на оконечности Лонг-Айленда в Нью-Йорке, обладает вескими основаниями на то, чтобы считаться катализатором научных открытий. Уже только список участников стоит того, чтобы прочитать его вслух и с выражением, потому что он краток и тем не менее содержит имена величайших американских физиков XX века. Вот он в алфавитном порядке: Ханс Бете, Дэвид Бом, Грегори Брейт, Виктор Вайскопф, Карл Дарроу, Хендрик Крамерс, Уиллис Лэмб, Дункан Макиннес, Роберт Маршак, Джон фон Нейман, Арнольд Нордсик, Роберт Оппенгеймер, Абрахам Пайс, Лайнус Полинг, Исидор Раби, Бруно Росси, Роберт Сербер, Эдвард Теллер, Джон Уилер, Джордж Уленбек, Ричард Фейнман, Герман Фешбах, Джон ван Флек и Джулиан Швингер. Читатель уже встречал в книге некоторые из упомянутых имен, а любой студент физического факультета, вероятно, знает большинство из них. Американский писатель Дэйв Барри однажды сказал: «Если одним словом определить, почему человеческая раса не раскрыла и никогда не раскроет полностью свой потенциал, то это будет слово “собрания”». Это, безусловно, верно, но встреча в Шелтер-Айленде была исключением. Собрание началось с презентации того, что с тех пор получило название *лэмбовского сдвига*. Уиллис Лэмб с помощью высокоточных микроволновых методов, разработанных в ходе Второй мировой войны, обнаружил, что спектр водорода на самом деле не до конца описывается старой квантовой теорией. Существовал мельчайший сдвиг наблюдаемых энергетических уровней, который нельзя было объяснить теорией, изложенной нами в первой части книги. Этот эффект был крохотным, но стал настоящим вызовом для собравшихся теоретиков.

Тут мы оставим Шелтер-Айленд, волнующийся после речи Лэмба, и обратимся к теории, возникшей в следующие месяцы и годы. Тем самым мы раскроем происхождение лэмбовского сдвига, а сейчас, чтобы разжечь ваш аппетит, приведем довольно загадочное описание ответа: протон и электрон в атоме водорода не одни.

QED – теория, описывающая, как электрически заряженные частицы, например электроны, взаимодействуют друг с другом и с частицами света (фотонами). Она одна способна объяснить все природные явления, за исключением гравитации и ядерных феноменов. К ядерным феноменам мы обратимся позже и объясним, почему атомное ядро не распадается, хотя представляет собой множество положительно заряженных протонов и нейтронов без заряда, которые в одну секунду разлетелись бы, если бы внутри ядра не происходили какие-то процессы. Практически все остальное – и уж точно все, что вы видите и ощущаете, – объясняется на глубинных уровнях QED. Материя, свет, электричество и магнетизм – все это QED.

Начнем с толкования системы, с которой мы неоднократно уже встречались в этой книге, а именно Вселенной с одним электроном. Кружки на рисунке со «скачками циферблатов» на [рис. 3.6](#) показывают множество возможных местонахождений электрона в какой-то момент времени. Чтобы вывести вероятность нахождения электрона в некоторой точке X в более позднее время, как говорят наши квантовые правила, мы должны позволить электрону перескочить в точку X из любой возможной исходной точки. Каждый скачок приносит в точку X циферблат, мы суммируем их и получаем ответ.

Сейчас мы сделаем то, что может изначально показаться слишком сложным, но, конечно, имеет под собой серьезные основания. Придется задействовать несколько A , B и T – иными словами, мы снова возвращаемся на поле твидовых жилетов и меловой пыли; не беспокойтесь, это ненадолго.

Когда частица из точки A в нулевое время направляется к точке B во время T , мы можем подсчитать, как будет выглядеть циферблат в точке B , переведя стрелки в точке A назад на величину, определенную расстоянием между B и A и временным интервалом. Иными словами, можем записать, что циферблат в точке B задается $C(A, 0) P(A, B, T)$, где $C(A, 0)$ представляет исходный циферблат в точке A и в нулевое время, а $P(A, B, T)$ – воплощение правила перевода и уменьшения циферблатов, связанного со скачком из A в B ^[44]. Мы будем называть $P(A, B, T)$ «пропагатором» (функцией распространения. – Прим. ред.) перемещения

из точки A в точку B . Теперь, когда известно правило перемещения из точки A в точку B , мы готовы вычислить вероятность нахождения частицы в точке X . На рис. 4.2 есть множество исходных точек, так что нам придется продвинуться в точку X из всех этих стартовых точек и сложить все получившиеся циферблаты. В нашей кажущейся зубодробительной нотации получается циферблат $C(X, T) = C(X_1, 0) P(X_1, X, T) + C(X_2, 0) P(X_2, X, T) + C(X_3, 0) P(X_3, X, T) + \dots$, где X_1, X_2, X_3 и так далее отражают все позиции частицы в нулевое время (то есть позиции кружков на [рис. 4.2](#)). Уточним: запись $C(X_3, 0) P(X_3, X, T)$ просто значит «взять циферблат в точке X_3 и переместить ее в точку X за время T ». Не стоит думать, что тут происходит нечто очень сложное. Все, что мы делаем, так это вкратце записываем то, что уже знаем: «взять циферблат в точке X_3 в нулевое время и рассчитать, насколько перевести стрелки и уменьшить циферблат в соответствии с путем частицы из точки X_3 в точку X в некоторое более позднее время T , а затем повторить процесс для всех остальных циферблатов в нулевое время и, наконец, сложить все циферблаты вместе по правилу сложения циферблатов». Уверены, вы согласитесь, что это слишком многословно, поэтому с сокращенной записью жить будет проще.

Мы имеем право считать, что пропагатор воплощает правило перевода и уменьшения циферблатов. Мы можем также считать пропагатор циферблатом. Чтобы оправдать это бессодержательное заявление, представьте, что мы с уверенностью знаем, что электрон находится в точке A во время $T = 0$ и что эта ситуация описывается циферблатом размера 1, показывающим 12 часов. Мы можем изобразить перемещение с помощью второго циферблата, и его размер совпадает с величиной, на которую должен быть уменьшен исходный циферблат, а время, которое показывает второй циферблат, соответствует величине необходимого перевода часов. Если скачок электрона из точки A в точку B требует уменьшения исходного циферблата в 5 раз и перевода стрелок на 2 часа назад, то пропагатор $P(A, B, T)$ можно представить в виде циферблата, размер которого равняется $1/5 = 0,2$, а стрелки которого указывают на 10 часов (то есть переведены на 2 часа назад с 12). Циферблат в точке B получается простым «умножением» исходного циферблата в точке A на циферблат-пропагатор.

Отступление для тех, кто разбирается в комплексных величинах: как $C(X_1, 0)$ и $C(X_2, 0)$, так и $P(X_1, X, T)$, $P(X_2, X, T)$ могут быть представлены в виде комплексного числа, и они сочетаются в соответствии с математическими правилами умножения комплексных чисел.

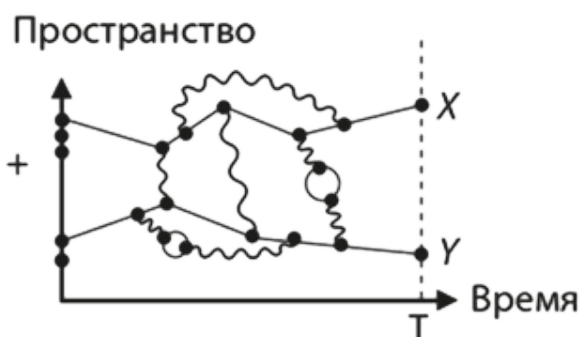
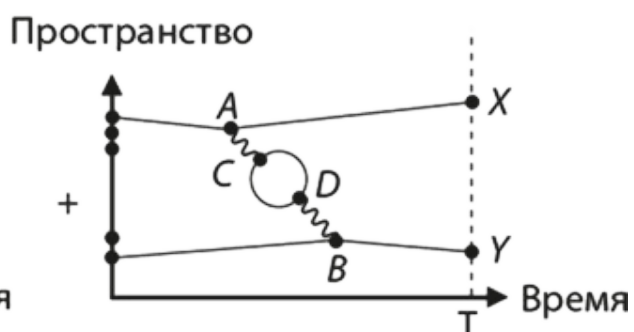
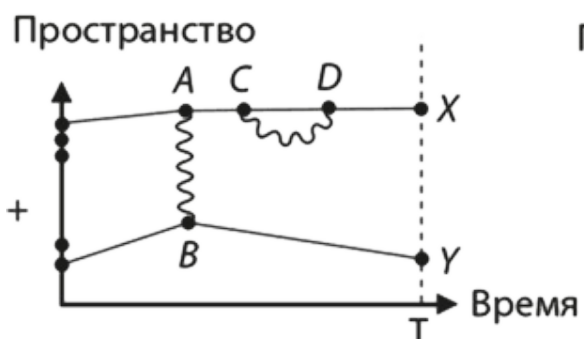
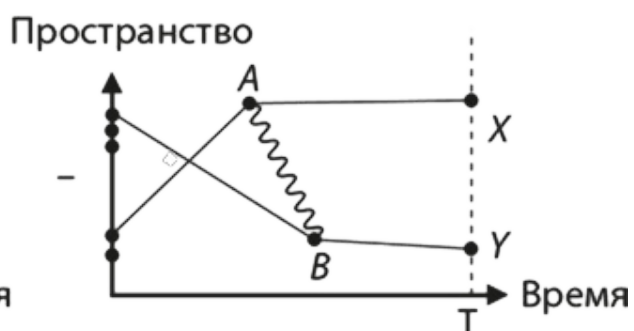
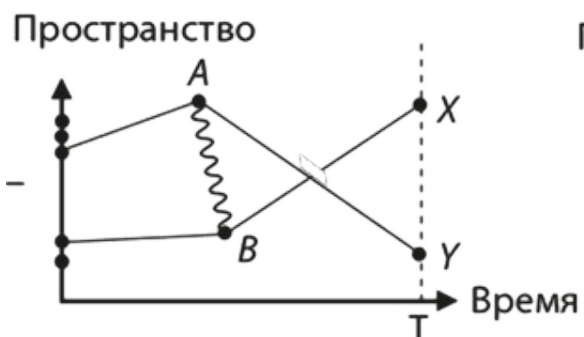
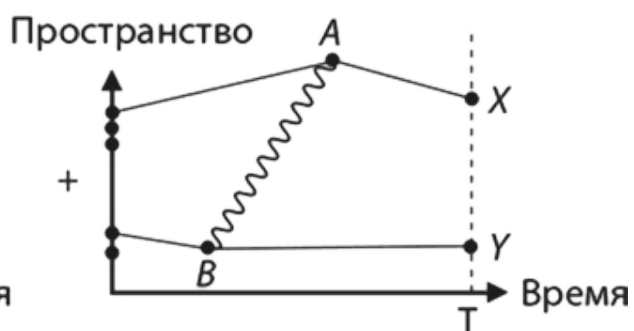
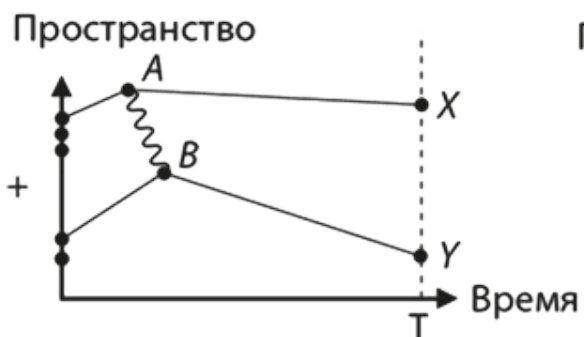
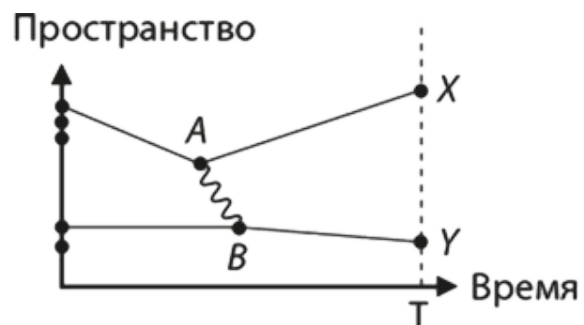
Для тех, кто не разбирается в комплексных величинах: это неважно, потому что описание с помощью циферблатов столь же точно. Мы всего лишь представили слегка иной взгляд на правило перевода циферблатов: можно переводить стрелки и уменьшать циферблат с помощью другого циферблата.

Нам ничто не мешает выработать правило умножения циферблатов, которое будет работать: умножить размеры двух циферблатов ($1 \times 0,2 = 0,2$) и совместить время на этих двух циферблатах таким образом, что стрелки первого циферблата будут переведены на время второго: 12 минус 10, то есть 2 часа. Кажется, что мы где-то слегка переусердствовали, и это определенно не то, что нужно, когда мы имеем дело лишь с одной частицей. Но физики ленивы, так что они не стали бы впадать во все эти сложные рассуждения, если бы это не сэкономило время и усилия в долгосрочной перспективе. Введенная здесь запись оказывается очень полезным способом следить за всеми переводами и уменьшениями циферблатов, когда мы подойдем к более интересному случаю с несколькими частицами – например, при рассмотрении атома водорода.

Независимо от деталей можно сказать, что в нашем методе подсчета вероятностей нахождения одинокой частицы где-то во Вселенной есть всего два ключевых момента. Во-первых, нужно указать набор исходных циферблатов, заключающих в себе информацию о том, где частица может находиться в нулевое время. Во-вторых, нужно знать пропагатор $P(A, B, T)$, который сам выступает в роли циферблата, заключающего в себе правило перевода и уменьшения для частицы, перескакивающей из точки A в точку B . Если мы знаем, как выглядит пропагатор для любой пары исходных и конечных точек, то мы знаем все, что нужно знать, и можем с уверенностью высчитать величественно скучную динамику Вселенной, содержащей одну частицу. Впрочем, к ней нельзя относиться пренебрежительно, потому что такое простое положение дел слабо запутывается, когда в игру вступает взаимодействие частиц. Введем же его.

На рис. 10.1 графически изображены все ключевые идеи, которые мы хотим здесь обсудить. Это наше первое знакомство с диаграммами Фейнмана – средством расчета профессионального специалиста по физике частиц. Наша задача: найти вероятность обнаружения пары электронов в точках X и Y в некоторое время T . Сначала нам сообщается, где электроны находятся в нулевое время, то есть как выглядят исходные поля циферблатов. Это важно, потому что способность ответить на подобный вопрос эквивалентна способности узнать, «что происходит во Вселенной, содержащей два электрона». Кажется, в этом нет особого прогресса,

но теперь весь мир у нас в кармане, потому что мы можем узнать, как основные строительные кирпичики природы взаимодействуют друг с другом.



+ ...

Рис. 10.1. Некоторые способы распада пары электронов. Электроны начинают движение слева и всегда заканчивают его в одной и той же паре точек, X и Y , во время T . Эти графики соответствуют нескольким различным способам, которыми частицы могут достичь точек X и Y

Для упрощения мы изобразили лишь одно измерение пространства, и время движется слева направо. Это никак не скажется на наших умозаключениях. Начнем с описания первой серии графиков на рис. 10.1. Мелкие точки в $T = 0$ соотносятся с возможными местоположениями двух электронов в нулевое время. Для иллюстративных целей предположим, что верхний электрон может находиться в одном из трех мест, в то время как нижний – в одном из двух (в реальном мире нам пришлось бы иметь дело с электронами, которые могут находиться в бесконечном количестве мест, но если бы пришлось это зарисовать, то кончились бы чернила).

Верхний электрон перескакивает в точку A в некоторое более позднее время и одновременно делает очень интересную вещь: он испускает фотон (на рисунке представлен волнистой линией).

После этого фотон перескакивает в точку B , где поглощается другим электроном. Верхний электрон затем перескакивает из точки A в точку X , а нижний – из точки B в точку Y . Это всего лишь один из бесконечного множества вариантов перехода исходной пары электронов в точки X и Y . Мы можем связать циферблат со всем процессом – назовем его «циферблат 1», сокращенно $C1$. QED должна дать нам правила игры, позволяющие вычислить этот циферблат.

Прежде чем углубляться в детали, разберемся, как это должно происходить. На самом верхнем рисунке представлен один из мириадом способов, которыми исходная пара электронов может попасть в точки X и Y . На других рисунках представлены иные способы. Основная идея в том, что для каждого возможного способа попадания электронов в точки X и Y мы должны определить квантовый циферблат – уже упомянутый $C1$ будет лишь первым в длинной череде циферблатов^[45]. Когда все циферблаты определены, нужно сложить их и получить один «главный» циферблат. Размер этого циферблата (возведенный в квадрат) укажет на вероятность нахождения пары электронов в точках X и Y . Итак, мы снова должны представить, что электроны движутся к точкам X и Y не по какому-то определенному маршруту, а скорее рассеиваются всеми способами сразу. На последних нескольких рисунках можно увидеть ряд более изощренных способов рассеивания электронов. Электроны не только обмениваются фотонами – они могут испускать и снова поглощать собственные фотоны,

а на последних двух рисунках вообще происходит нечто странное. На них показан сценарий, при котором кажется, что фотон испускает электрон, который «ходит по кругу», прежде чем заканчивает свой путь там же, где начал: более подробно об этом мы скажем чуть позже. Сейчас же можно просто представить ряд все более сложных диаграмм, соответствующих случаям, при которых электроны испускают и поглощают большое количество фотонов, прежде чем в итоге завершают путь в точках X и Y . Придется рассматривать многочисленные пути, которые могут окончиться для электронов в точках X и Y , но два правила формулируются очень четко: электроны могут только перескакивать с места на место и испускать или поглощать один фотон. Вот и все: электроны могут перескакивать или расширяться. Более подробное рассмотрение показывает, что ни один из приведенных выше рисунков не нарушает двух этих правил, потому что на них не изображено ничего более сложного, чем сочленение двух электронов и фотона. Сейчас мы должны объяснить, как определять соответствующие циферблаты – один для каждой диаграммы на рис. 10.1.

Сосредоточимся на самой верхней диаграмме и посмотрим, как определить внешний вид связанного с нею циферблата (циферблат $C1$). В самом начале процесса есть два электрона, и каждый из них имеет свой циферблат. Следует начать с их перемножения в соответствии с правилом умножения циферблатов. Мы получим новый единый циферблат, который обозначим буквой C . Умножение циферблатов имеет смысл, потому что нельзя забывать – циферблаты служат для обозначения вероятностей, а если имеются две независимые вероятности, то способом их сочетания будет перемножение. Например, вероятность выпадения орла на двух монетах будет равна $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$. Точно так же получающийся в результате циферблат C указывает на вероятность того, что два электрона будут находиться на исходных позициях. Остальное тоже связано с умножением циферблатов. Верхний электрон перескакивает в точку A , так что существует связанный с этим циферблат; назовем его $P(1, A)$, то есть «частица – particle – 1 перескакивает в точку A ». Тем временем нижний электрон перескакивает в точку B , и для этого тоже есть свой циферблат, который мы назовем $P(2, B)$. Точно так же имеются еще два циферблата, соответствующие переходу электронов в конечные точки; их мы обозначим как $P(A, X)$ и $P(B, Y)$. Наконец, существует и циферблат, связанный с фотоном, который перескакивает из точки A в точку B . Поскольку фотон – это не электрон, правило распространения фотона должно отличаться от правила распространения электрона, так что для его циферблата нужно использовать другой символ. Обозначим циферблат, соответствующий

скачку фотона, как $L(A, B)$ ^[46]. Теперь мы попросту перемножаем все циферблаты, получая один «главный»: $R = C P(1, A) \times P(2, B) \times P(A, X) \times P(B, Y) \times L(A, B)$. Мы уже близки к успеху, но нужно еще немного уменьшить циферблаты, потому что правило QED по поводу того, что происходит, когда электрон испускает или поглощает фотон, говорит о необходимости введения уменьшающего коэффициента g . На нашей диаграмме верхний электрон испускает фотон, а нижний его впитывает, так что коэффициентов становится два, и мы используем величину g^2 . Теперь все действительно готово: конечный «циферблат 1» получается с помощью формулы $C1 = g^2 \times R$.

Уменьшающий коэффициент, возможно, выглядит немного произвольно, но имеет очень важную физическую интерпретацию. Он очевидным образом связан с вероятностью испускания электроном фотона, так что отражает величину электромагнитной силы. Где-то в наших вычислениях мы должны были задать связь с реальным миром, потому что сейчас высчитываем реальные вещи. И как ньютонова гравитационная постоянная G несет в себе всю информацию о силе гравитации, так g несет всю информацию о величине электромагнитной силы^[47].

Если бы мы проводили полные расчеты, сейчас пришлось бы обратиться к следующей диаграмме, отображающей иной способ достижения той же парой электронов тех же точек X и Y . Вторая диаграмма очень напоминает первую: электроны начинают свой путь из тех же точек, только на этот раз верхний электрон испускает фотон в другой точке пространства и в другое время, а нижний электрон впитывает этот фотон тоже в другое время и в другой точке пространства. Все остальное происходит точно так же, и мы получаем второй циферблат – «циферблат 2», обозначаемый «C2». Мы продолжаем снова и снова повторять всю процедуру для каждого и любого возможного места испускания электрона и каждого и любого возможного места его поглощения. Мы должны также принять во внимание, что электроны могут начинать движение из нескольких различных исходных точек. Основная идея в том, что нужно учесть каждый и любой способ доставки электронов в точки X и Y и ассоциировать все эти способы со своими циферблатами. Собрав все циферблаты, мы «просто» складываем их, получая один конечный циферблат, размер которого указывает на вероятность нахождения одного электрона в точке X и второго – в точке Y . Теперь мы закончили, и нам предстоит выяснить, как два электрона взаимодействуют друг с другом, хотя другого выхода, кроме как подсчитывать вероятности, нет.

То, что мы описали, – это самое ядро квантовой электродинамики, другие силы природы можно описать примерно схожим образом. Мы вернемся к этому чуть позже, пока же нужно поговорить кое о чем еще.

Сначала – абзац с описанием двух небольших, но важных деталей. Во-первых, мы упростили суть дела, проигнорировав то, что у электронов есть спин и что они по этому признаку делятся на два типа. Кроме того, спин есть и у фотонов (это бозоны), которые делятся на три типа. Это немного затрудняет вычисления, потому что мы должны следить, с какими типами фотонов и электронов имеем дело на каждой стадии перехода и рассеивания. Во-вторых, если вы внимательно читали, могли заметить знаки минуса перед парой диаграмм на рис. 10.1. Они стоят там, потому что мы говорим об идентичных электронах, перескакивающих из точки X в точку Y , а две диаграммы со знаками минуса соответствуют взаимному обмену электронов по сравнению с другими диаграммами, то есть электрон, который начал движение из верхнего поля точек, завершает его в точке Y , а второй, нижний электрон оказывается в точке X . И как мы уже говорили в главе 7, такая смена конфигураций сочетается только после дополнительного перевода циферблата на 6 часов – отсюда и знак минуса.

Не исключено, что вы заметили и возможный недостаток в нашем плане: существует бесконечное количество диаграмм, описывающих варианты перехода частиц из точки X в точку Y , и суммирование бесконечного количества циферблатов может оказаться, мягко говоря, изнурительным занятием. К счастью, при каждом рассеянии пары электрон – фотон в расчеты входит еще один множитель – g , что уменьшает размер итогового циферблата. Это значит, что чем сложнее диаграмма, тем меньше соответствующий циферблат и тем менее важен он для итогового циферблата. Для квантовой электродинамики величина g довольно мала (около 0,3), так что уменьшение при увеличении числа рассеяний становится намного более явным. Очень часто достаточно учесть только такие диаграммы, как первые пять на рис. 10.1, где рассеяний не более двух, что экономит множество усилий.

Такой процесс вычисления циферблатов (на научном жаргоне известный как «амплитуда») для каждой диаграммы Фейнмана, суммирование всех циферблатов и возведение полученного итогового циферблата в квадрат с целью определения вероятности протекания процесса – это хлеб с маслом современной физики частиц.

Но под поверхностью всего, что мы сказали, таится загадочная проблема, которая очень сильно беспокоит одних физиков и совершенно безразлична другим.

Проблема измерения в квантовой теории

При складывании циферблатов, соответствующих разным диаграммам Фейнмана, появляется эффект квантовой интерференции. Как и в случае с двухщелевым экспериментом, когда нужно было принять во внимание все возможные траектории пути частицы к экрану, мы должны учесть все вероятности перехода пары частиц из исходных положений в окончательные. Это позволяет прийти к правильному ответу, потому что становится возможной интерференция между различными диаграммами. Только в конце процесса, когда все циферблаты просуммированы и все интерференции учтены, нужно возвести в квадрат размер итогового циферблата и вычислить вероятность протекания процесса. Просто. А теперь посмотрите на рис. 10.2.

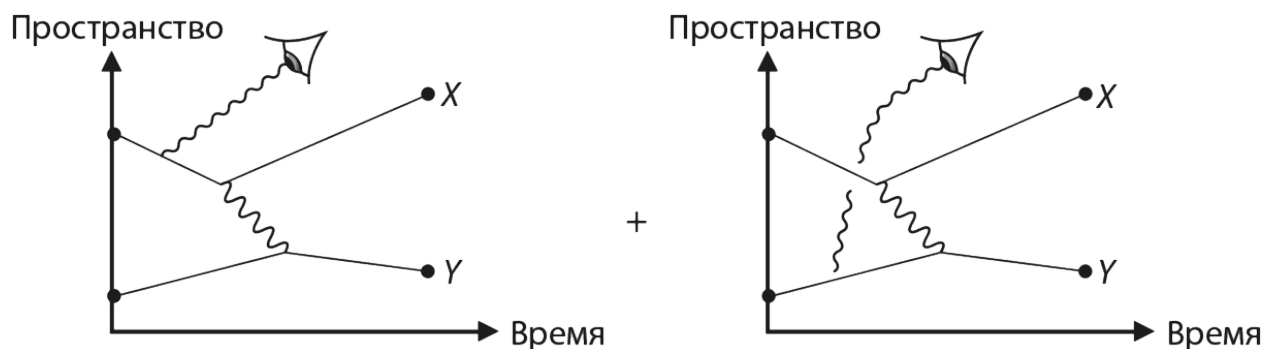


Рис. 10.2. Человеческий глаз смотрит на происходящее

Что случится, если мы попытаемся определить, что делают электроны при перескакивании в точки X и Y ? Единственный способ исследовать, что происходит, – взаимодействовать с системой по правилам игры. В квантовой электродинамике это значит, что мы должны придерживаться правила рассеивания электронов-фотонов, поскольку никаких других правил нет. Итак, попробуем взаимодействовать с одним из фотонов, который может быть испущен одним из двух электронов. Определим его с помощью личного детектора фотонов – собственных глаз. Заметьте, мы задаем теоретически иной вопрос: «Какова вероятность найти электрон в точке X , другой электрон в точке Y , а также фотон в собственном глазу?» Мы знаем, что сделать для получения ответа: нужно сложить все циферблаты, связанные с различными диаграммами для двух электронов, которые завершаются нахождением одного электрона в точке X , второго

в точке Y и фотона «в собственном глазу». Точнее, мы должны говорить о том, как фотон с этим «моим собственным глазом» взаимодействует.

Хотя все звучит относительно просто, процесс вскоре вырывается из-под контроля. Например, фотон отрывается от электрона, находящегося в одном из атомов моего глаза; это запускает цепочку событий, которая в конечном счете ведет к моему восприятию фотона: я сознательно наблюдаю вспышку света в собственном глазу. Итак, чтобы полностью описать то, что происходит, мы должны определить положение каждой частицы моего мозга, поскольку все они реагируют на появление фотона. И тут мы вплотную подходим к так называемой проблеме измерения в квантовой теории.

До сих пор мы довольно подробно описывали методы вычисления вероятностей в квантовой физике. Под этим понимается, что квантовая теория позволяет вычислить шансы измерения некоего определенного исхода эксперимента. В этом процессе нет никаких двусмысленностей – достаточно следовать правилам игры и не отклоняться от вычисления вероятности того, что может произойти. Однако случается нечто неприятное. Представьте, что ученый проводит эксперимент, для которого возможны лишь два исхода – «да» и «нет». Итак, эксперимент состоялся, и в результате экспериментатор записал исход «да» или «нет», но уж никак не то и другое одновременно. Пока все хорошо.

Теперь представим, что позже второй экспериментатор измеряет нечто другое (что именно – не имеет значения).

Снова примем как данность, что эксперимент прост и возможных исходов два – «есть щелчок» и «нет щелчка». Правила квантовой физики диктуют: мы должны вычислить вероятность того, что второй эксперимент даст «щелчок», просуммировав циферблаты, связанные со всеми вероятностями, ведущими к такому исходу. Это может включать в себя вариант, что первый экспериментатор получает исход «да», и дополняющий его вариант с исходом «нет». Только после суммирования двух исходов мы получим правильный ответ и узнаем, какова вероятность результата «есть щелчок» во втором эксперименте. Но так ли это? Действительно ли нужно принимать в расчет необходимость поддержания связности мира даже после того, как некое измерение завершилось? Или же на самом деле после получения результата «да» или «нет» в первом эксперименте будущее зависит лишь от измерения? Например, во втором эксперименте это значит, что если первый экспериментатор получает «да», то вероятность исхода «есть щелчок» во втором эксперименте должна вычисляться не исходя из суммы вероятностей «да» и «нет», а лишь после учета вероятностей,

при которых мир может развиваться от «первый экспериментатор получает ответ да» до «второй эксперимент дает щелчок». Разумеется, при этом получится не тот ответ, как при суммировании обоих исходов «да» и «нет», так что, если мы стремимся к полному пониманию, нужно выяснить, как следует поступать.

Чтобы узнать, какой из методов верен, требуется определить, есть ли что-то особенное в самом процессе измерения. Изменяет ли он мир, препятствуя сложению квантовых амплитуд, или просто оказывается частью обширной сложной сети вероятностей, оставаясь всегда в одной и той же суперпозиции? Людям приятно считать, что измерение каким-то образом (получением ответа «да» или «нет», например) необратимо меняет будущее, так что, если это правда, никакое будущее измерение не может пойти одновременно путями «да» и «нет». Но совершенно непонятно, действительно ли это так, потому что, судя по всему, всегда существует вероятность найти такое будущее состояние Вселенной, к которому можно подойти обоими способами. Для таких состояний законы квантовой физики, если воспринимать их буквально, прямо-таки заставляют вычислять вероятность их проявления путем суммирования вариантов «да» и «нет». Каким бы странным это ни казалось, это не более странно, чем суммирование историй, которым мы постоянно занимались в этой книге. Все дело в том, что мы настолько серьезно относимся к этой идее, что готовы совершать соответствующие действия даже применительно к людям и их действиям. С этой точки зрения никакой «проблемы измерения» не существует. Только если мы настаиваем, что акт измерения и его результат – «да» или «нет» – реально меняет природу вещей, возникают проблемы, потому что в этом случае на нас лежит обязанность объяснить, что же запускает процесс изменений и нарушает квантовую связность.

Подход к квантовой механике, который мы обсуждаем, отвергает саму идею, что природа каждый раз, когда кто-то (или что-то) «проводит измерение», выбирает конкретную версию реальности. Он лежит в основе так называемой интерпретации множественности миров. Это очень привлекательно, потому что выступает логическим следствием серьезного восприятия законов, управляющих элементарными частицами, и распространения их на все феномены. Но последствия такого серьезного восприятия шокируют, потому что придется представить, что Вселенная – это когерентная суперпозиция любых действий, которые могут произойти, а воспринимаемый нами мир (который, как мы предполагаем, конкретная реальность) таков лишь потому, что мы ошибочно считаем,

что при измерении теряется когерентность. Иными словами, мое сознательное восприятие мира объясняется тем, что крайне маловероятно, чтобы альтернативные (потенциально интерферирующие) истории могли привести к тому же самому состоянию «сейчас», а значит, квантовой интерференцией можно пренебречь.

Если измерение не разрушает квантовой связности, то в каком-то смысле вся жизнь протекает внутри одной гигантской диаграммы Фейнмана, и наше желание думать, что происходят некие определенные вещи, – следствие нашего слишком приблизительного восприятия мира. Можно предположить, что в какой-то момент будущего с нами может произойти нечто, что может быть объяснено лишь тем, что в прошлом мы произвели одновременно два противоречащих друг другу действия. Разумеется, этот эффект незначителен, так как очевидно, что «я получил работу» и «я не получил работу» – два события, оказывающие совершенно противоположное воздействие на нашу жизнь, и не так-то просто придумать сценарий, который привел бы к идентичным будущим Вселенным (помните, что мы должны складывать только те амплитуды, которые ведут к одинаковым исходам). В этом случае получение и неполучение работы не слишком интерферируют, и мы воспринимаем мир так, что одно событие произошло, а другое нет. Однако все обстоит тем менее однозначно, чем менее два альтернативных сценария противоположны, и, как мы уже видели, для взаимодействий небольшого количества частиц суммирование разных возможностей совершенно необходимо. Так как в повседневной жизни задействовано огромное количество частиц, две существенно разные конфигурации атомов в определенное время (например, ситуации получения и неполучения работы) с крайне малой вероятностью могут привести к значительным изменениям в некоем будущем сценарии. В свою очередь, это значит, что мы можем двигаться вперед, считая, что мир необратимо изменился в результате измерения, даже если на самом деле ничего подобного не произошло.

Но все это не так важно, когда дело доходит до серьезной задачи – вычисления вероятности, что нечто произойдет при постановке эксперимента. Мы знаем правила решения этой задачи и можем без каких-либо проблем их применить. Но когда-нибудь такое удачное стечение обстоятельств может измениться: сейчас экспериментальное разрешение вопроса о том, как наше прошлое может с помощью квантовой интерференции повлиять на будущее, попросту невозможно. Та степень, до которой умствования по поводу «истинной природы» мира (или миров),

описываемого квантовой теорией, могут мешать научному прогрессу, отлично отражается позицией физической школы «заткнись и считай», которая последовательно отвергает любые попытки рассуждений о реальности вещей.

Антиматерия

Вернемся к нашему миру. На рис. 10.3 показан еще один способ расхождения двух электронов. Один из входящих перескакивает из точки А в точку Х, по дороге испуская фотон. Вроде все как всегда, но в данном случае электрон поворачивает во времени – обратно в точку Y, где поглощает еще один фотон, и направляется в будущее, в котором он может быть обнаружен в точке С. Эта диаграмма никак не противоречит правилам перехода и рассеяния, потому что электрон испускает и поглощает фотоны в точном соответствии с предписаниями теории. Это может произойти в соответствии с правилами, а стало быть, как утверждает название этой книги, действительно происходит. Но подобное поведение, судя по всему, нарушает правила здравого смысла, потому что приходится принять тот факт, что электроны движутся назад во времени. Это интересная научная фантастика, но нарушениями причинно-следственных связей Вселенную не построишь. Кроме того, таким образом квантовая теория, кажется, вступает в конфликт со специальной теорией относительности Эйнштейна.

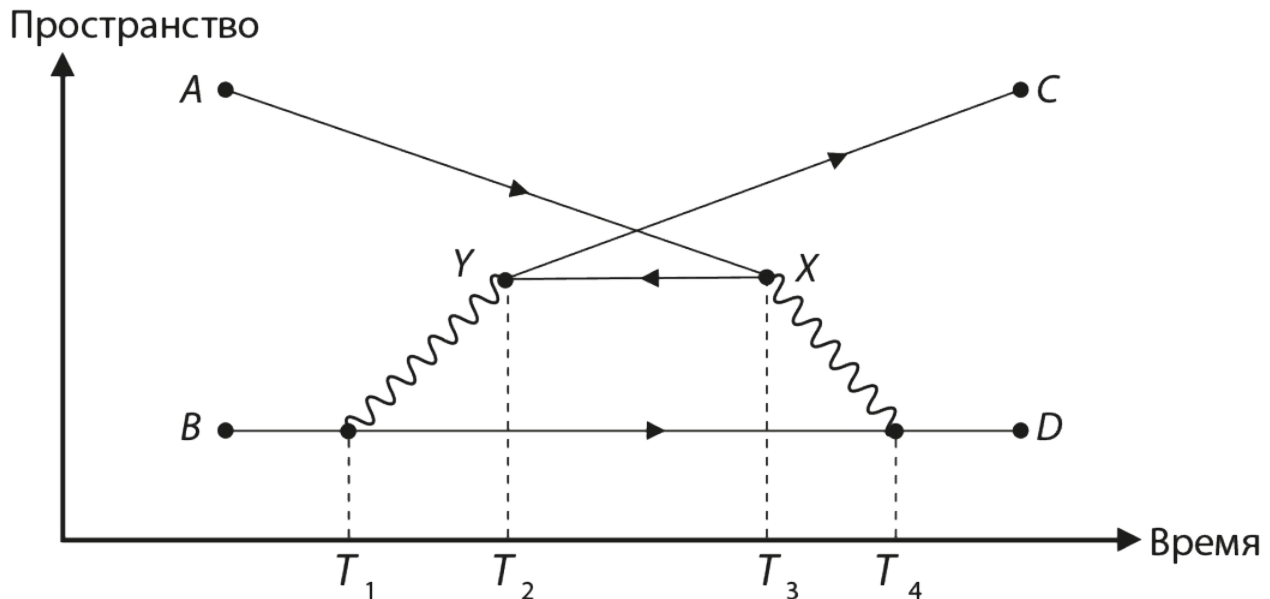


Рис. 10.3. Антиматерия... или электрон, который движется назад во времени

Впрочем, как ни странно, подобные путешествия во времени не запрещены субатомным частицам, как в 1928 году установил Дирак.

Мы можем понять, почему все не так невероятно, как кажется, если переистолковать происходящее на рис. 10.3 с точки зрения «движения вперед». Достаточно вести отсчет событий на диаграмме слева направо. Начнем со времени $T = 0$, когда существует мир всего из двух электронов, находящихся в точках A и B . Мы продолжаем рассматривать мир из двух электронов до времени T_1 , когда нижний электрон испускает фотон; между временными точками T_1 и T_2 мир состоит из двух электронов и одного фотона.

Во время T_2 фотон погибает и заменяется электроном (который заканчивает свой путь в точке C) и второй частицей (финиширующей в точке X). Эту вторую частицу мы не можем назвать электроном, потому что это «электрон, который движется назад во времени». Вопрос вот в чем: как выглядит электрон, который движется назад во времени, с точки зрения наблюдателя (например, с вашей), двигающегося вперед во времени?

Для ответа на этот вопрос представим, что мы ведем видеосъемку электрона, двигающегося поблизости от какого-то магнита, как показано на рис. 10.4. Если электрон движется не слишком быстро^[48], он будет совершать обычные круговые движения. Возможность отклонения электронов магнитом – это, как мы уже говорили, основная идея работы не только старомодных телевизоров на катодно-лучевых трубках, но и ускорителей частиц, в том числе Большого адронного коллайдера.

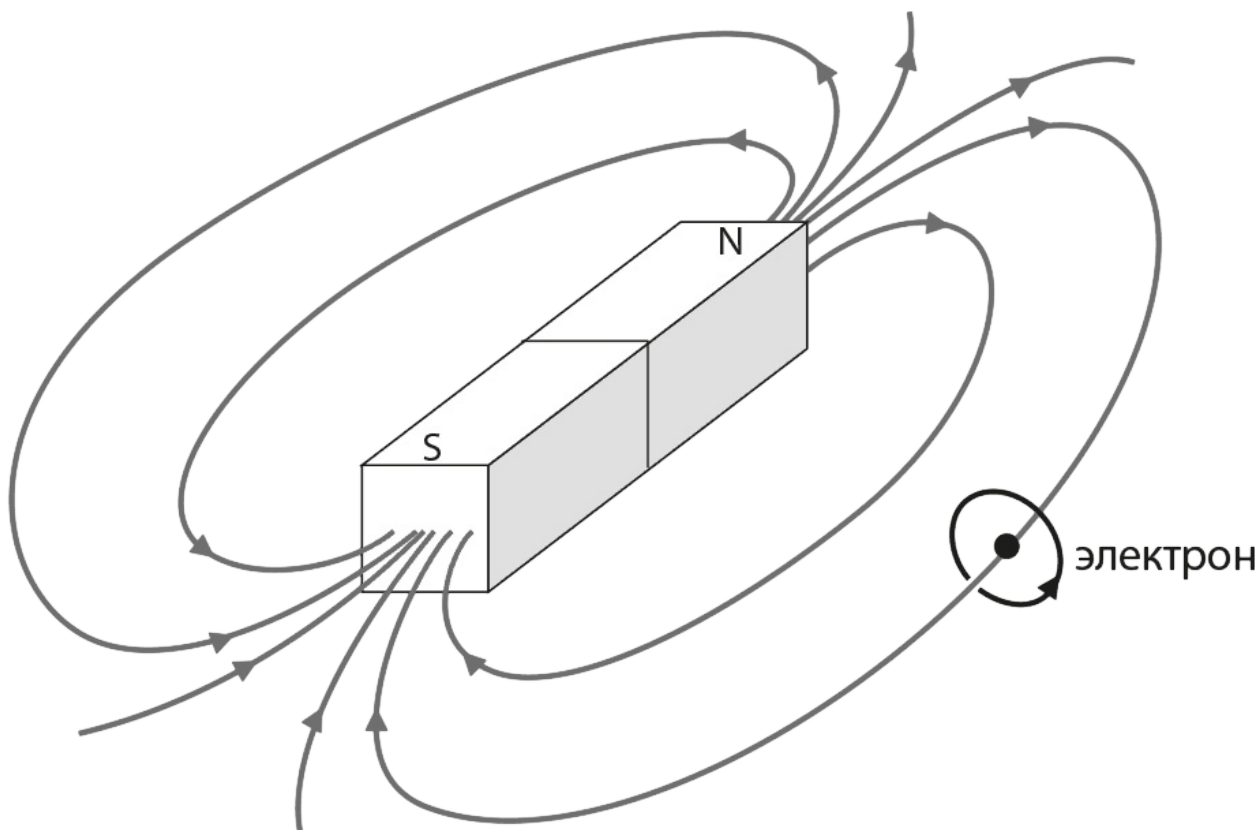


Рис. 10.4. Электрон, движущийся вокруг магнита

А теперь представьте, что будет, если пустить видеозапись задом наперед. Именно так «электрон, который движется назад во времени» и будет выглядеть с точки зрения наблюдателя, который «движется вперед во времени». Теперь мы видим, как «движущийся назад во времени» электрон вращается в противоположном направлении по мере того, как идет запись. С точки зрения физика видеозапись частицы, движущейся назад во времени, идентична видеозаписи частицы, движущейся вперед во времени, с тем исключением, что эта частица будет нести положительный электрический заряд. Итак, мы получили ответ на свой вопрос: электроны, движущиеся назад во времени, выглядят как «электроны с положительным зарядом».

Таким образом, если электроны действительно совершают путешествия назад во времени, мы можем ожидать, что столкнемся с некими «электронами с положительным зарядом».

Такие частицы действительно существуют и называются «позитронами». Понятие этих частиц ввел в начале 1931 года Дирак, чтобы решить проблему, вставшую при выводе квантово-механического уравнения для электрона: уравнение, судя по всему, предсказывало

существование частиц с отрицательной энергией. Позднее Дирак рассказал, о чем думал в этот момент, и признался, в частности, что был твердо уверен в правильности математики: «Я смирился с тем фактом, что отрицательные энергетические состояния нельзя исключить из математической теории, и решил, что нужно просто найти для них физическое объяснение».

Всего через год Карл Андерсон, который, судя по всему, не был знаком с предсказаниями Дирака, заметил некоторые странности в работе своего экспериментального аппарата по наблюдению частиц из состава космического излучения. Он сделал следующий вывод: «Кажется необходимым призвать на помощь положительно заряженную частицу, масса которой сопоставима с массой электрона». Это еще один образец всей мощи математических рассуждений. Чтобы объяснить математическое уравнение, Дирак ввел идею новой частицы – позитрона, и уже через несколько месяцев было обнаружено, что эта частица порождается в столкновениях частиц космического излучения. Позитрон – наша первая встреча с краеугольным камнем научной фантастики: антиматерией.

Вооружившись интерпретацией путешествующих во времени электронов как позитронов, мы можем закончить работу по объяснению рис. 10.3. Нужно сказать, что, когда фотон достигает точки Y во время T_2 , он распадается на электрон и позитрон. Каждая из этих частиц движется вперед до времени T_3 , когда позитрон из точки Y достигает точки X , где сливается с исходным верхним электроном и производит второй фотон. Этот фотон распространяется до времени T_4 , когда он поглощается нижним электроном.

Может показаться, что все это несколько притянuto за уши: античастицы появились из нашей теории, потому что мы разрешили частицам путешествовать назад во времени. Правила перехода и рассеяния позволяют частицам перескакивать как вперед, так и назад во времени, и несмотря на то, что мы, возможно, хотели бы им это не позволить, оказывается, что мы не можем и не должны им в этом препятствовать. Более того, оказывается, что, если мы не разрешаем частицам перескакивать назад во времени, как раз тогда и нарушается закон причины и следствия. Это странно: кажется, что должно быть ровно наоборот. Однако все не случайно и намекает на лежащие в основе глубинные математические структуры. Возможно, у вас создалось впечатление, что правила перехода и рассеяния частиц установлены как-то произвольно. Можно ли установить еще какие-то правила рассеяния и подрегулировать правила перехода и изучить последствия? Но если сделать так, мы почти

наверняка получим плохую теорию – например, такую, которая будет нарушать закон причины и следствия. *Квантовая теория поля* (QFT) – название той самой глубинной математической структуры, которая и лежит в основе правил перехода и рассеяния. Удивительно, но это *единственный* способ создать квантовую теорию мельчайших частиц с учетом специальной теории относительности. Вооружившись аппаратом квантовой теории поля, правила перехода и рассеяния частиц становятся незыблемыми, и мы лишаемся свободы выбора. Это очень важный результат для исследователя фундаментальных законов, потому что использование «симметрии» для устранения выбора создает впечатление, что Вселенная просто должна быть «вот такой», и это создает ощущение лучшего ее понимания. Мы использовали здесь слово «симметрия», потому что оно кажется очень подходящим: можно считать, что теории Эйнштейна накладывают симметрические ограничения на структуру пространства и времени. Иные «симметрии» еще более ограничивают правила перехода и рассеяния, и мы вкратце рассмотрим их в следующей главе.

Прежде чем закончить с квантовой электродинамикой, необходимо устранить последнее непонимание. Как вы помните, первый доклад на конференции в Шелтер-Айленде касался лэмбовского перехода – аномалии в спектре водорода, которая не объяснялась в рамках квантовой теории Гейзенберга и Шрёдингера. Через неделю после этой встречи Ганс Бете выдал первые, еще приблизительные вычисления ответа. На рис. 10.5 показан атом водорода с точки зрения квантовой электродинамики. Электромагнитное взаимодействие, связывающее протон и электрон, можно представить в виде ряда диаграмм Фейнмана возрастающей сложности, как и в случае с двумя взаимодействующими электронами на рис. 10.1. Мы изобразили две простейшие возможные диаграммы на рис. 10.5. До квантовой электродинамики расчеты энергетических уровней электрона включали в себя только верхнюю диаграмму на рисунке, которая отражает физику электрона, удерживаемого в потенциальной яме, которая создана протоном. Но мы уже выяснили, что при взаимодействии может произойти еще много всего. Вторая диаграмма на рис. 10.5 показывает кратковременную флуктуацию фотона в электрон-позитронной паре, и этот процесс тоже стоит учесть при расчете возможных энергетических уровней электрона. Эта диаграмма, как и многие другие, вносит в результат подсчетов^[49] небольшие коррективы.

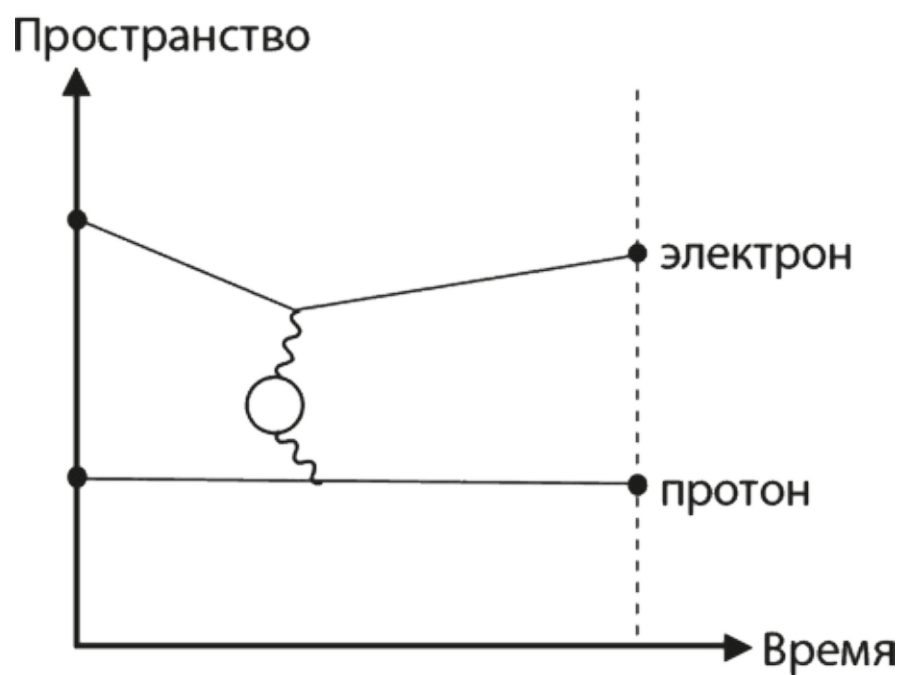
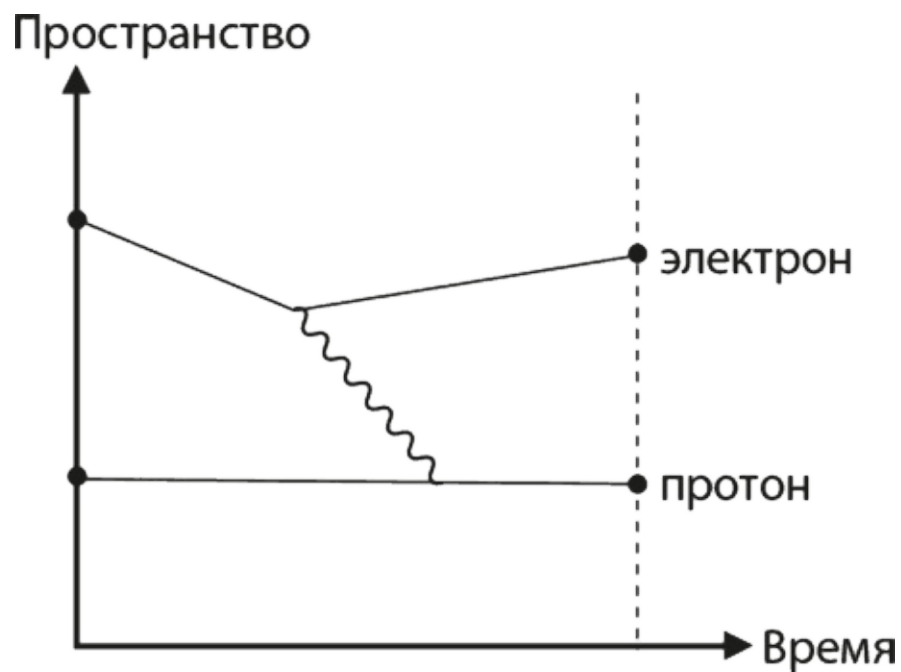


Рис. 10.5. Атом водорода

Бете совершенно справедливо включил в расчеты важные результаты «однопетлевых» диаграмм, подобных изображенным на рисунке, и обнаружил, что они оказывают некоторое влияние на сдвиг

энергетических уровней, а следовательно, и на видимый спектр. Его результаты соответствовали измерениям Лэмба. Иными словами, квантовая электродинамика заставляет представить атом водорода в виде невероятной какофонии субатомных частиц, порождающихся и прекращающихся существование. Лэмбовский сдвиг стал первой непосредственной встречей человечества с этими эфирными квантовыми флуктуациями.

Прошло немного времени – и эстафетную палочку перехватили двое других участников встречи в Шелтер-Айленде: Ричард Фейнман и Джулиан Швингер. Через пару лет квантовая электродинамика уже развилась в ту теорию, которую мы знаем сейчас, – прототип квантовой теории поля и образец для тех теорий, которым еще предстояло появиться на свет и которые описывали сильное и слабое взаимодействия. За свои заслуги Фейнман, Швингер и японский физик Синъитиро Томонага в 1965 году получили Нобелевскую премию «За фундаментальные работы по квантовой электродинамике, имевшие глубокие последствия для физики элементарных частиц». К этим глубоким последствиям мы и переходим.

11. Пустое пространство не такое уж пустое

Не все в мире берет начало во взаимодействии частиц с электрическим зарядом. Квантовая электродинамика не объясняет «сильных ядерных» процессов, которые сцепляют кварки внутри протонов и нейтронов, и «слабых ядерных» процессов, благодаря которым горит наше Солнце.

Нельзя писать книгу о квантовой теории природы и оставить за ее рамками половину фундаментальных сил, так что в этой главе мы заполним пробел, прежде чем погрузиться непосредственно в пустое пространство. Окажется, что вакуум – это очень интересное место, полное возможностей и препятствий на пути частиц.

В первую очередь нужно подчеркнуть, что слабое и сильное ядерное взаимодействия описываются при помощи точно такого же подхода к квантовой теории поля, о котором шла речь при разговоре о квантовой электродинамике. Именно в этом смысле можно говорить о серьезных последствиях работы Фейнмана, Швингера и Томонаги. В целом теория этих трех взаимодействий получила весьма нейтральное название *Стандартной модели физики частиц*. Когда мы пишем эти строки, Стандартная модель проходит тестирование на разрыв в самой большой и самой хитроумной машине в истории человечества – Большом адронном коллайдере ЦЕРН (он же БАК). «На разрыв» – удачное выражение, потому что в отсутствие чего-то до сих пор не открытого Стандартная модель прекращает делать осмысленные предсказания при энергиях, которыми сопровождаются в БАК столкновения протонов на скорости, почти равной скорости света. На языке этой книги можно сказать, что квантовые правила начинают порождать циферблаты со стрелками длиной более 1, а это значит, что определенные процессы, связанные со слабым квантовым взаимодействием, начинают предсказываться с вероятностью более 100 %. Это очевидный нонсенс, и предполагается, что БАК должен найти нечто новое. Проблема в том, чтобы идентифицировать это новое в сотнях миллионов столкновений протонов, которые каждую секунду происходят на глубине 100 м под Юрскими горами.

Стандартная модель действительно содержит лекарство от болезни повышенных вероятностей, и это лекарство известно под названием хиггсовского механизма. Если оно верно, то БАК должен обнаружить еще одну природную частицу – бозон Хиггса, после чего наши взгляды на содержимое пустого пространства должны кардинально измениться.

В этой главе мы обратимся к хиггсовскому механизму чуть позже, но сначала нужно дать краткое описание пока победоносной, но уже трещащей по швам Стандартной модели.

Стандартная модель физики частиц

На рис. 11.1 мы перечислили все известные частицы. Это строительные кирпичики Вселенной, по крайней мере такова точка зрения на момент написания этой книги, но мы ожидаем обнаружить еще несколько – возможно, мы увидим бозон Хиггса или новую частицу, связанную с существующей в большом количестве загадочной темной материей, которая, вероятно, необходима для описания всей Вселенной. Или, возможно, нас ожидают суперсимметричные частицы, предсказанные теорией струн, или возбуждения Калуцы – Клейна, характерные для дополнительных измерений пространства, или техникварки, или лептоковарки, или... теоретических рассуждений множество, и обязанность тех, кто проводит эксперименты на БАК, в том, чтобы сузить поле поиска, исключить неверные теории и указать путь вперед.

Кварки	u	c	t	γ	Переносчики взаимодействия
	d	s	b	g	
Лептоны	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	
	e	μ	τ	W	
I II III					

Рис. 11.1. Частицы природы

Все, что можно увидеть и потрогать; любая неодушевленная машина, любое живое существо, любая скала, любой человек на планете Земля, любая планета и любая звезда в каждой из 350 миллиардов галактик в наблюдаемой Вселенной состоит из частиц из первого столбца. Вы сами состоите из сочетания всего трех частиц – верхнего и нижнего кварков и электрона. Кварки составляют атомное ядро, а электроны, как мы уже видели, отвечают за химические процессы. Оставшаяся частица из первого столбца – нейтрино – возможно, знакома вам меньше, но Солнце пронзает каждый квадратный сантиметр вашего тела 60 миллиардами таких частиц каждую секунду. Они в основном без задержки проходят через вас и всю Землю – потому-то вы никогда их не замечали и не ощущали их присутствия. Но они, как мы вскоре увидим, играют ключевую роль в процессах, которые дают энергию Солнца, а следовательно, делают возможной саму нашу жизнь.

Эти четыре частицы образуют так называемое первое поколение материи – вместе с четырьмя фундаментальными природными взаимодействиями это все, что, судя по всему, нужно для создания Вселенной. Однако по причинам, которые пока до конца не понятны, природа предпочла снабдить нас еще двумя поколениями – клонами первого, только эти частицы более массивны. Они представлены во втором и третьем столбцах рис. 11.1. Топ-кварк в особенности превосходит массой другие фундаментальные частицы. Он был открыт на ускорителе в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми под Чикаго в 1995 году, и его масса, согласно измерениям, более чем в 180 раз превосходит массу протона. Почему топ-кварк оказался таким монстром, притом что он столь же похож на точку, как и электрон, пока загадка. Хотя все эти дополнительные поколения материи не играют непосредственной роли в обычных делах Вселенной, они, вероятно, были ключевыми игроками сразу после Большого взрыва... Но это совсем другая история.

На рис. 11.1 в правом столбце показаны также частицы-переносчики взаимодействия. Гравитация в таблице не представлена. Попытка перенести вычисления Стандартной модели на теорию гравитации наталкиваются на определенные сложности. Отсутствие в квантовой теории гравитации некоторых важных свойств, характерных для Стандартной модели, не позволяет применять там те же методы. Мы не утверждаем, что ее не существует вовсе; теория струн – это попытка принять гравитацию во внимание, но пока успехи этой попытки ограничены. Так как гравитация очень слаба, она не играет значительной

роли в экспериментах по физике частиц, и по этой весьма прагматической причине мы не будем больше о ней говорить. В прошлой главе мы установили, что фотон служит посредником в распространении электромагнитного взаимодействия между электрически заряженными частицами, и такое поведение определяется новым правилом рассеяния. Частицы W и Z делают то же самое для слабого взаимодействия, а глюоны переносят сильное взаимодействие. Основные различия между квантовыми описаниями сил связаны с тем, что правила рассеяния различны. Да, все (почти) так просто, и некоторые новые правила рассеяния мы привели на рис. 11.2. Сходство с квантовой электродинамикой позволяет легко понять функционирование сильного и слабого взаимодействий; нам нужно только понимать, каковы правила рассеяния для них, после чего можно начертить такие же диаграммы Фейнмана, которые мы приводили для квантовой электродинамики в прошлой главе. К счастью, изменение правил рассеяния – это очень важно для физического мира.

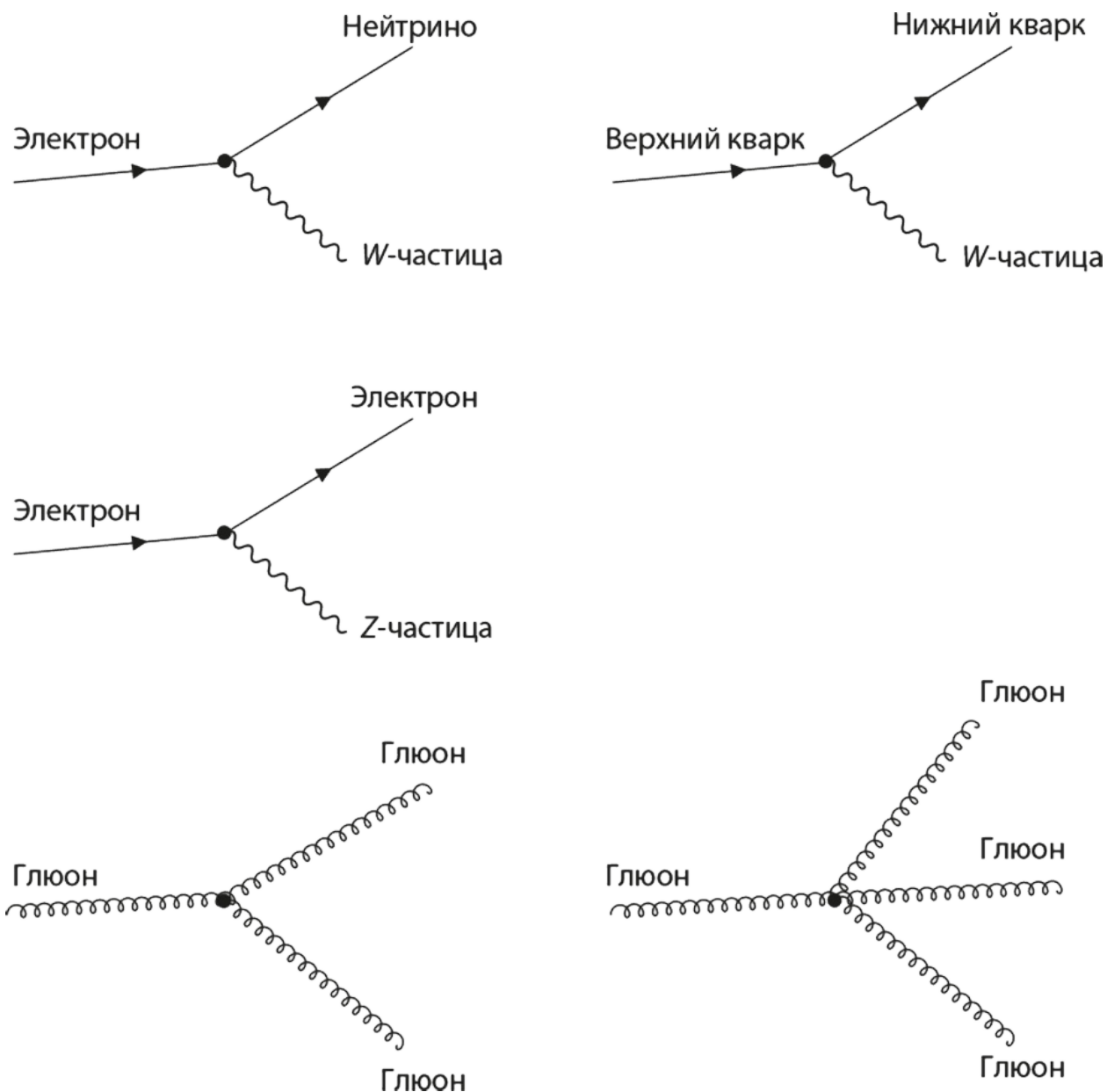


Рис. 11.2. Некоторые правила рассеяния для сильного и слабого взаимодействий

Если бы мы писали учебник по квантовой физике, можно было бы перейти к выводу правил рассеяния для каждого из показанных на рис. 11.2 процессов, а также для многих других. Эти правила известны как правила Фейнмана, и они впоследствии помогли бы вам – или компьютерной программе – рассчитать вероятность того или иного процесса, как мы делали это в главе о квантовой электродинамике.

Эти правила отражают нечто очень важное о нашем мире, и очень удачно, что их можно свести к набору простых картинок и положений.

Но мы вообще-то не пишем учебник по квантовой физике, так что вместо этого сосредоточимся на диаграмме справа вверху: это *правило рассеяния*, особенно важное для жизни на Земле. Оно показывает, как верхний кварк переходит в нижний, испуская W -частицу, и это поведение приводит к грандиозным результатам в ядре Солнца.

Солнце – это газообразное море протонов, нейтронов, электронов и фотонов объемом в миллион земных шаров. Это море коллапсирует под собственной силой тяжести. Сжатие невероятной силы разогревает солнечное ядро до 15 000 000 °С, и при такой температуре протоны начинают сливаться, формируя ядра гелия. При этом высвобождается энергия, которая увеличивает давление на внешние уровни звезды, уравнивая внутреннюю силу тяжести.

Подробнее мы рассмотрим это состояние шаткого равновесия в эпилоге, а сейчас просто хотим понять, что значит «протоны начинают сливаться друг с другом». Кажется, что все довольно просто, но точный механизм такого слияния в солнечном ядре был источником постоянных научных споров в 1920–1930-е годы. Британский ученый Артур Эддингтон первым предположил, что источник энергии Солнца – ядерный синтез, но быстро обнаружилось, что температура вроде бы слишком мала для запуска этого процесса в соответствии с известными на тот момент законами физики. Однако Эддингтон придерживался своего мнения. Хорошо известно его замечание: «Гелий, с которым мы имеем дело, должен был образоваться в какое-то время в каком-то месте. Мы не спорим с критиком, заявляющим, что звезды недостаточно горячи для этого процесса; мы предлагаем ему найти место пожарче».

Проблема состоит в том, что, когда два быстро движущихся протона в солнечном ядре сближаются, в результате электромагнитного взаимодействия (или, на языке квантовой электродинамики, в результате обмена фотонами) они отталкиваются. Для слияния им нужно сойтись едва ли не до полного перекрытия, а солнечные протоны, как хорошо было известно Эддингтону и его коллегам, двигаются недостаточно быстро (потому что Солнце недостаточно горячо) для преодоления взаимного электромагнитного отталкивания. Ребус разрешается так: на авансцену выходит W -частица и спасает ситуацию. При столкновении один из протонов может превратиться в нейтрон, обратив один из своих верхних кварков в нижний, как указано на иллюстрации к правилу рассеяния на рис. 11.2. Теперь новообразованный нейтрон и оставшийся протон могут сойтись очень близко, поскольку нейтрон не несет никакого электрического заряда. На языке квантовой теории поля это значит, что обмена фотонами,

при котором нейтрон и протон отталкивались бы друг от друга, не происходит. Освободившись от электромагнитного отталкивания, протон и нейтрон могут слиться вместе (в результате сильного взаимодействия), образуя дейтрон, что быстро приводит к образованию гелия, которое высвобождает энергию, дающую жизнь звезде. Этот процесс показан на рис. 11.3 и отражает тот факт, что W -частица живет недолго, распадаясь на позитрон и нейтрино, – это и есть источник тех самых нейтрино, которые в таких количествах пролетают через ваше тело. Воинственная защита Эддингтоном синтеза как источника солнечной энергии была справедливой, хотя у него не было ни тени готового решения. W -частица, объясняющая то, что происходит, была открыта в ЦЕРН вместе с Z -частицей в 1980-е годы.

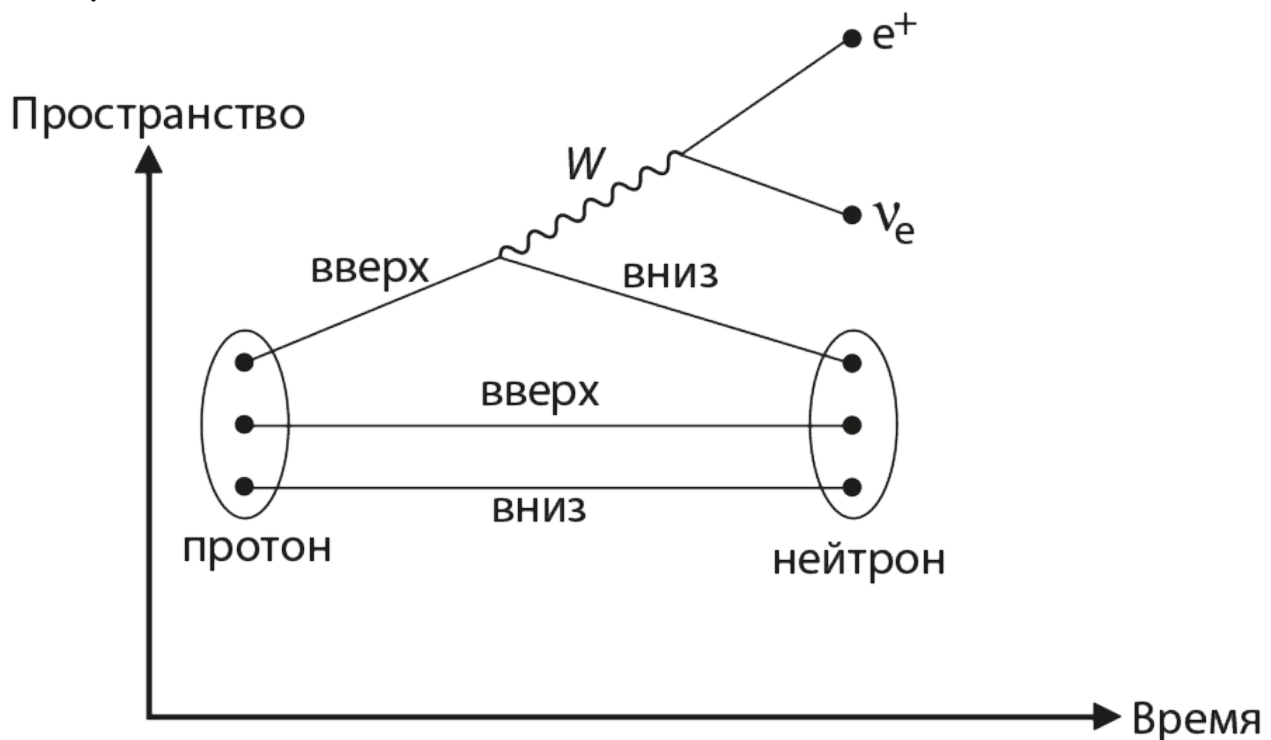


Рис. 11.3. Превращение протона в нейтрон в рамках слабого взаимодействия с испусканием позитрона и нейтрино. Без этого процесса Солнце не могло бы светить

В завершение краткого обзора Стандартной модели обратимся к сильному взаимодействию. Правила рассеивания таковы, что только кварки могут переходить в глюоны. Более того, они с большей вероятностью сделают именно это, чем что-либо еще. Предрасположенность к испусканию глюонов – именно та причина,

по которой сильное взаимодействие получило свое название и по которой рассеяние глюонов способно преодолеть электромагнитную силу отталкивания, которая могла бы привести положительно заряженный протон к разрушению. К счастью, сильное ядерное взаимодействие распространяется лишь на небольшое расстояние. Глюоны покрывают расстояние не более 1 фемтометра (10–15 м) и вновь распадаются. Причина, по которой влияние глюонов настолько ограничено, особенно по сравнению с фотонами, способными путешествовать через всю Вселенную, состоит в том, что глюоны могут превращаться и в другие глюоны, как показано на двух последних диаграммах рис. 11.2. Эта уловка со стороны глюонов существенно отличает сильное взаимодействие от электромагнитного и ограничивает поле его деятельности содержимым атомного ядра. У фотонов подобного самоперехода нет, и это хорошо, потому что иначе вы бы не видели, что происходит у вас перед носом, потому что фотоны, летящие к вам, отталкивались бы от тех, которые двигаются вдоль вашей линии зрения. То, что мы вообще можем видеть, – одно из чудес природы, которое к тому же служит ярким напоминанием, что фотоны вообще редко взаимодействуют.

Мы не объяснили ни откуда берутся все эти новые правила, ни почему Вселенная содержит именно такой набор частиц. И на то есть свои причины: на самом деле мы не знаем ответа ни на один из этих вопросов. Частицы, из которых состоит наша Вселенная – электроны, нейтрино и кварки, – это актеры, исполняющие главные роли в разворачивающейся на наших глазах космической драме, но пока у нас нет убедительных способов объяснения, почему состав актеров должен быть именно таков.

Однако верно, что, имея список частиц, мы можем частично предсказать способ их взаимодействия друг с другом, предписываемый правилами рассеяния. Правила рассеяния физики взяли не из воздуха: во всех случаях они предсказываются на том основании, что теория, описывающая взаимодействия частиц, должна быть квантовой теорией поля с неким дополнением, получившим название калибровочной инвариантности^[50].

Обсуждение происхождения правил рассеяния завело бы нас слишком далеко от основного направления книги – но мы все же хотим повторить, что основные законы очень просты: Вселенная состоит из частиц, которые двигаются и взаимодействуют в соответствии с рядом правил перехода и рассеяния. Мы можем пользоваться этими правилами при вычислении вероятности того, что «нечто» *происходит*, складывая ряды циферблатов, причем каждый циферблат соответствует каждому способу, которым

«нечто» *может произойти.*

Происхождение массы

Заявляя, что частицы могут как перескакивать из точки в точку, так и рассеиваться, мы вступаем в область квантовой теории поля. Переход и рассеивание – это практически все, чем она занимается. Однако мы пока почти не упоминали массу, потому что решили оставить самое интересное напоследок.

Современная физика частиц призвана дать ответ на вопрос о происхождении массы и дает его с помощью прекрасного и удивительного раздела физики, связанного с новой частицей. Причем новая она не только в том смысле, что мы еще не встречали ее на страницах этой книги, но и потому, что на самом деле никто на Земле еще не встречался с ней «лицом к лицу». Эта частица называется бозоном Хиггса, и БАК уже близок к ее обнаружению. К сентябрю 2011 года, когда мы пишем эту книгу, на БАК наблюдался любопытный объект, подобный бозону Хиггса, но пока произошло недостаточно событий^[51], чтобы решить, он это или нет. Возможно, это были лишь интересные сигналы, которые при дальнейшем рассмотрении исчезли. Вопрос о происхождении массы особенно замечателен тем, что ответ на него ценен и помимо нашего очевидного желания узнать, что такое масса. Попытаемся объяснить это довольно загадочное и странным образом сконструированное предложение более подробно.

Когда мы говорили о фотонах и электронах в квантовой электродинамике, ввели правило перехода для каждого из них и отметили, что эти правила отличаются: для связанного с переходом электрона из точки A в точку B мы использовали символ $P(A, B)$, а для соответствующего правила, связанного с фотоном, – символ $L(A, B)$. Настало время рассмотреть, насколько сильно отличаются правила в этих двух случаях. Разница состоит, например, в том, что электроны делятся на два типа (как мы знаем, они «крутятся» одним из двух различных способов), а фотоны – на три, но это различие нас сейчас интересовать не будет. Мы обратим внимание на другое: электрон обладает массой, а фотон – нет. Именно это мы и будем исследовать.

На рис. 11.4 показан один из вариантов, как мы можем представить распространение частицы, обладающей массой. Частица на рисунке перескакивает из точки A в точку B за несколько стадий. Она переходит из точки A в точку 1, из точки 1 в точку 2 и так далее, пока, наконец,

не попадает из точки 6 в точку B . Интересно, однако, что в таком виде правило для каждого скачка – это правило для частицы с нулевой массой, но с одной важной оговоркой: каждый раз, когда частица меняет направление, мы должны применить новое правило уменьшения циферблата, причем величина уменьшения обратно пропорциональна массе описываемой частицы. Это значит, что при каждом переводе часов циферблата, связанные с тяжелыми частицами, уменьшаются менее резко, чем циферблаты, связанные с более легкими частицами. Важно подчеркнуть, что это правило системное.

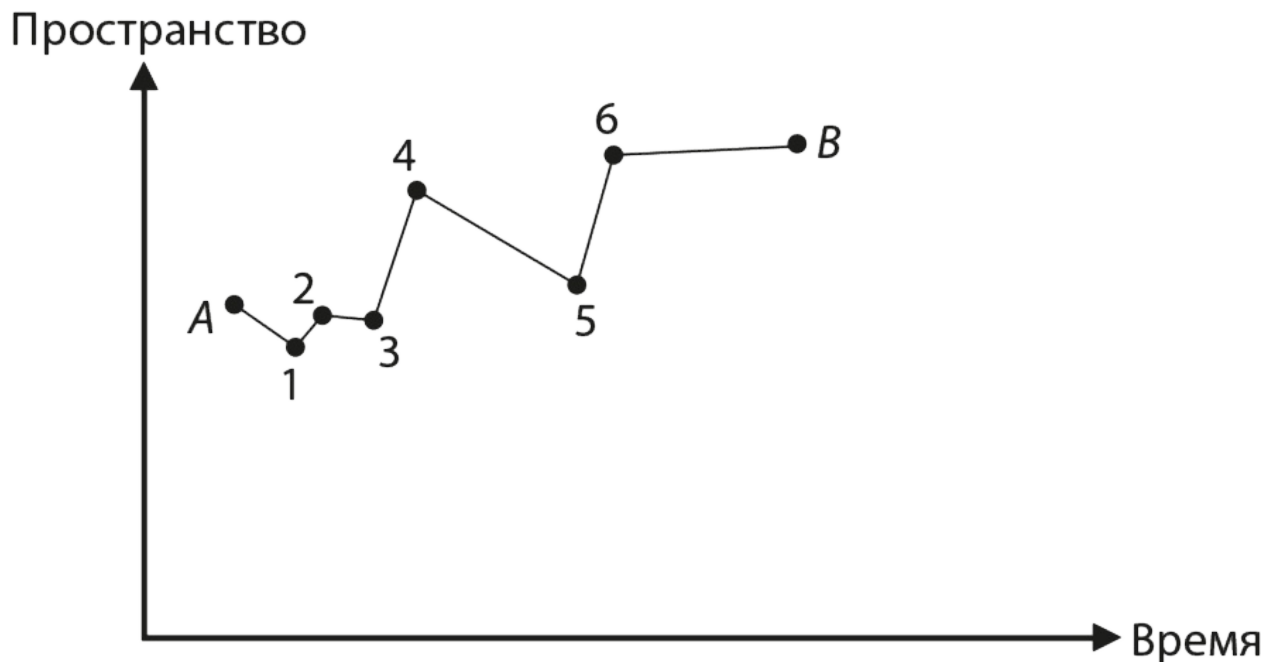


Рис. 11.4. Массивная частица, движущаяся из точки A в точку B

И зигзагообразное движение, и уменьшение циферблата непосредственно вытекают из правил Фейнмана для распространения массивной частицы без каких-то других предположений^[52]. На рис. 11.4 показан лишь один способ попадания частицы из точки A в точку B – после шести поворотов и шести уменьшений. Чтобы получить итоговый циферблат, связанный с массивной частицей, переходящей из точки A в точку B , мы, как всегда, должны сложить бесконечное количество циферблатов, связанных со всеми возможными способами, которыми частица может проделать свой зигзагообразный путь из точки A в точку B . Самый простой способ – прямой путь без всяких поворотов, но придется принять во внимание и маршруты с огромным количеством поворотов.

Для частиц с нулевой массой уменьшающий коэффициент, связанный с каждым поворотом, просто убийственен, потому что бесконечен. Иными словами, после первого же поворота мы уменьшаем циферблат до нуля. Таким образом, для частиц без массы имеет значение только прямой маршрут – другим траекториям просто не соответствует никакой циферблат. Именно этого мы и ожидали: для частиц без массы мы можем использовать правило скачка. Однако для частиц с ненулевой массой повороты разрешены, хотя если частица очень легкая, то коэффициент уменьшения налагает суровое вето на траектории со многими поворотами.

Таким образом, наиболее вероятные маршруты содержат мало поворотов. И наоборот, тяжелым частицам не грозит слишком большой уменьшающий коэффициент при повороте, так что они чаще описываются маршрутами с зигзагообразным движением. Поэтому можно считать, что тяжелые частицы можно считать частицами без массы, которые двигаются из точки *A* в точку *B* зигзагообразно. Количество зигзагов – это и есть то, что мы называем «массой».

Все это замечательно, потому что теперь у нас появился новый способ представления массивных частиц. На рис. 11.5 показано распространение трех разных частиц с возрастающей массой из точки *A* в точку *B*. Во всех случаях правило, связанное с каждым «зигзагом» их пути, совпадает с правилом для частицы без массы, и за каждый поворот приходится расплачиваться уменьшением циферблата. Но не следует слишком радоваться: пока мы еще не объяснили ничего фундаментального. Все, что пока удалось сделать, – это заменить слово «масса» словами «стремление к зигзагам». Это можно было сделать, потому что оба варианта – математически эквивалентные описания распространения массивной частицы. Но даже при таких ограничениях наши выводы кажутся интересными, а сейчас мы узнаём, что это, оказывается, не просто математический курьез.

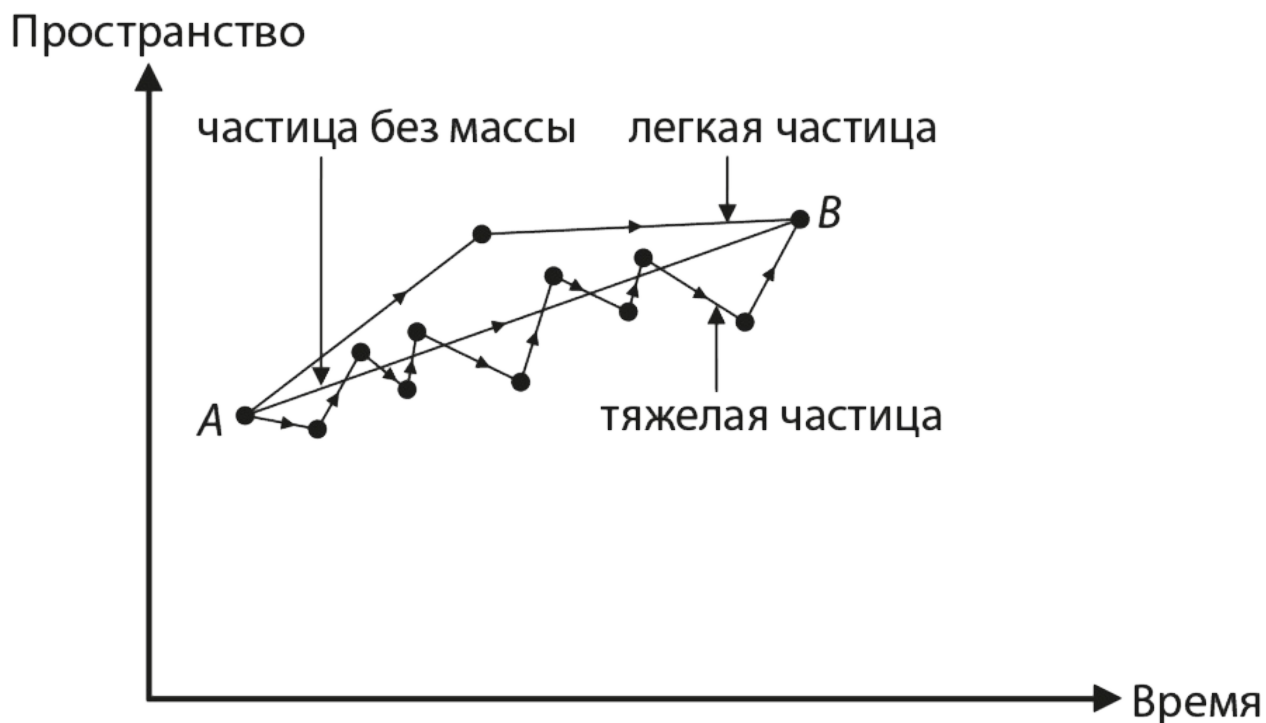


Рис. 11.5. Частицы с возрастающей массой движутся из точки А в точку В. Чем более массивна частица, тем больше зигзагов в ее движении

Перенесемся в царство умозрительного – хотя к тому моменту, когда вы будете читать эту книгу, теория может уже и получить свое подтверждение.

В настоящий момент на БАК совершаются столкновения протонов общей энергией в 7 ТэВ. ТэВ – это тераэлектронвольты, что соответствует энергии, которую имел бы электрон, пропущенный через разность потенциалов в 7 000 000 миллионов вольт. Для сравнения отметим, что примерно такова энергия, которую субатомные частицы имели через триллионную долю секунды после Большого взрыва, и этой энергии достаточно, чтобы создать прямо из воздуха массу, эквивалентную массе 7000 протонов (в соответствии с формулой Эйнштейна $E = mc^2$). И это лишь половина расчетной энергии: при необходимости БАК может включить и более высокие обороты.

Одна из основных причин, по которым 85 стран всего мира соединили силы, создали этот гигантский дерзкий эксперимент и управляют им, – стремление найти механизм, отвечающий за создание массы фундаментальных частиц. Наиболее распространенная идея происхождения массы состоит в ее связи с зигзагами и устанавливает новую фундаментальную частицу, на которую «наталкиваются» другие

частицы в своем движении по Вселенной. Эта частица – бозон Хиггса. В соответствии со Стандартной моделью, без бозона Хиггса фундаментальные частицы перескакивали бы с места на место без всяких зигзагов, и Вселенная была бы совсем иной. Но если мы заполним пустое место частицами Хиггса, они смогут отклонять частицы, заставляя их совершать зигзаги, что, как мы уже установили, ведет к появлению «массы». Примерно так, как вы идете через переполненный бар: вас толкают то слева, то справа, и вы практически зигзагами пробираетесь к стойке.

Механизм Хиггса получил свое имя в честь эдинбургского теоретика Питера Хиггса; это понятие было введено в физику частиц в 1964 году. Идея, очевидно, носилась в воздухе, потому что ее высказали в одно и то же время сразу несколько человек: во-первых, конечно, сам Хиггс, а также Роберт Браут и Франсуа Энглер, работавшие в Брюсселе, и лондонцы Джеральд Гуральник, Карл Хейган и Том Киббл. Их работы, в свою очередь, основывались на более ранних трудах многих предшественников, в том числе Вернера Гейзенберга, Ёитиро Намбу, Джеффри Голдстоуна, Филипа Андерсона и Стивена Вайнберга. Полное осмысление этой идеи, за которое в 1979 году Шелдон Глэшоу, Абдус Салам и Вайнберг получили Нобелевскую премию, – это и есть не что иное, как Стандартная модель физики частиц. Сама идея довольно проста: пустое место на самом деле не пусто, что и приводит к зигзагообразному движению и появлению массы. Но нам, очевидно, нужно еще многое объяснить. Как же оказалось, что пустое место вдруг стало набито частицами Хиггса, – разве мы не заметили бы этого раньше? И как это странное состояние вещей вообще возникло? Предложение действительно кажется довольно экстравагантным. Кроме того, мы не объяснили, почему у некоторых частиц (например, у фотонов) нет массы, а другие (W -бозоны и топ-кварки) обладают массой, сопоставимой с массой атома серебра или золота.

На второй вопрос ответить легче, чем на первый, по крайней мере на первый взгляд. Частицы взаимодействуют друг с другом только по правилу рассеивания; не отличаются в этом отношении и частицы Хиггса. Правило рассеивания для топ-кварка подразумевает вероятность его слияния с частицей Хиггса, и соответствующее уменьшение циферблата (помните, что при всех правилах рассеивания действует уменьшающий коэффициент) будет гораздо менее значительным, чем в случае с более легкими кварками. Вот «почему» топ-кварк настолько массивнее, чем верхний кварк. Однако это, разумеется, не объясняет,

почему правило рассеивания именно таково. В современной науке ответ на этот вопрос обескураживает: «Потому что». Этот вопрос сродни другим: «Почему поколений частиц именно три?» и «Почему сила притяжения так слаба?» Точно так же для фотонов нет правила рассеивания, которое давало бы им возможность составить пару с частицами Хиггса, в результате они с ними и не взаимодействуют. Это, в свою очередь, приводит к тому, что они не движутся зигзагами и не имеют массы. Хотя мы, можно сказать, сняли с себя ответственность, все же это хоть какое-то объяснение. И уж определенно можно сказать, что если БАК поможет обнаружить бозоны Хиггса и подтвердить, что они действительно образуют пары с другими частицами подобным образом, то мы можем с уверенностью заявить, что нашли возможность удивительным образом подсмотреть за тем, как работает природа.

На первый же из наших вопросов найти ответ несколько труднее. Напомним, мы интересовались: как вышло, что пустое пространство оказалось заполнено частицами Хиггса? Для разогрева скажем следующее: квантовая физика утверждает, что нет такого понятия, как пустое пространство. То, что мы так называем, – это кипучий водоворот субатомных частиц, от которых никак нельзя отделаться. Осознав это, мы уже гораздо проще отнесемся к тому, что пустое пространство может быть полно частиц Хиггса. Но обо всем по порядку.

Представьте себе маленький кусочек межзвездного пространства – одинокий уголок Вселенной в миллионах световых лет от ближайшей галактики. Со временем оказывается, что частицы постоянно возникают там ниоткуда и исчезают в никуда. Почему? Дело в том, что правила разрешают процесс создания и аннигиляции античастицы-частицы. Пример можно найти на нижней диаграмме рис. 10.5: представьте, что на нем нет ничего, кроме электронной петли. Теперь диаграмма соответствует внезапному возникновению и последующему исчезновению электрон-позитронной пары. Так как чертёж петли не нарушает никаких правил квантовой электродинамики, мы должны признать, что это реальная возможность: помните, все, что может случиться, случается. Эта конкретная возможность – всего один из бесконечного множества вариантов бурной жизни пустого пространства, и, поскольку мы живем в квантовой Вселенной, правильно будет суммировать все эти вероятности. Иными словами, структура вакуума невероятно богата и состоит из всех возможных способов появления и исчезновения частиц.

В последнем абзаце мы упомянули, что вакуум не так уж пуст, но картина его существования выглядит довольно демократичной:

все элементарные частицы играют свои роли. Что же так отличает именно бозон Хиггса? Если бы вакуум был всего лишь кипучей питательной средой для рождения и аннигиляции пар антиматерия-материя, то все элементарные частицы продолжали бы обладать нулевой массой: сами по себе квантовые петли массу не порождают^[53]. Нет, нужно населить вакуум чем-то иным, и здесь в игру вступает целый вагон частиц Хиггса. Питер Хиггс просто сделал предположение, что пустое пространство полно некими частицами^[54], не чувствуя себя обязанным пускаться в глубокие пояснения, почему это так. Частицы Хиггса в вакууме создают зигзаговый механизм, а также постоянно, без отдыха взаимодействуют с каждой массивной частицей во Вселенной, избирательно замедляя их движение и создавая массу. Общий результат взаимодействий между обычной материей и вакуумом, наполненным частицами Хиггса, состоит в том, что мир из бесформенного становится разнообразным и великолепным, населенным звездами, галактиками и людьми.

Конечно, возникает новый вопрос: откуда бозоны Хиггса вообще взялись? Ответ пока неизвестен, но считается, что это остатки так называемого фазового перехода, который произошел вскоре после Большого взрыва. Если достаточно долго смотреть на оконное стекло зимним вечером, когда становится холоднее, вы увидите, как из водяного пара ночного воздуха, словно по волшебству, возникает структурированное совершенство ледяных кристаллов. Переход от водяного пара ко льду на холодном стекле – это и есть фазовый переход, поскольку молекулы воды переформируются в ледяные кристаллы; это спонтанное нарушение симметрии бесформенного облака пара вследствие понижения температуры. Ледяные кристаллы формируются, потому что это энергетически благоприятно. Как мяч катится с горы, чтобы внизу прийти к более низкому энергетическому состоянию, как электроны перестраиваются вокруг атомных ядер, формируя связи, удерживающие молекулы вместе, так и точеная красота снежинки – это конфигурация молекул воды с более низкой энергией, чем бесформенное облако пара.

Мы полагаем, что нечто подобное произошло и в начале истории Вселенной. Новорожденная Вселенная представляла собой изначально горячие частицы газа, затем расширилась и охладилась, и выяснилось, что вакуум без бозонов Хиггса оказался энергетически неблагоприятным, и естественным стало состояние вакуума, полного частиц Хиггса. Этот процесс, по сути, схож с конденсацией воды в капли или льдинки на холодном стекле. Спонтанное образование капелек воды при их

конденсации на холодном стекле создает впечатление, что они попросту образовались «ниоткуда». Так и в случае с бозонами Хиггса: на горячих стадиях сразу после Большого взрыва вакуум кипел мимолетными квантовыми флуктуациями (представленными петлями на наших диаграммах Фейнмана): частицы и античастицы возникали из ниоткуда и снова исчезали в никуда. Однако затем, когда Вселенная остыла, произошло нечто радикальное: внезапно, из ниоткуда, как капля воды появляется на стекле, возник «конденсат» частиц Хиггса, которые сначала удерживались вместе благодаря взаимодействию, объединенные в недолговечную взвесь, через которую распространялись другие частицы.

Представление о том, что вакуум заполнен материалом, предполагает, что мы, как и все остальное во Вселенной, живем внутри гигантского конденсата, который возник при остывании Вселенной, как возникает на рассвете утренняя роса. Чтобы мы не думали, что вакуум обрел содержание лишь в результате конденсации бозонов Хиггса, укажем, что в вакууме есть не только они. По мере дальнейшего охлаждения Вселенной кварки и глюоны тоже конденсировались, и получились, что неудивительно, кварковые и глюонные конденсаты. Существование этих двух хорошо установлено экспериментально, и они играют очень важную роль в нашем понимании сильного ядерного взаимодействия. На самом деле именно благодаря этой конденсации появилась большая часть массы протонов и нейтронов. Вакуум Хиггса, таким образом, в конечном счете создал наблюдаемые нами массы элементарных частиц – кварков, электронов, тау-, W - и Z -частиц. Кварковый конденсат включается в дело, когда нужно объяснить, что происходит, если множество кварков объединяется в протон или нейтрон. Интересно, что хотя механизм Хиггса имеет относительно немного значения для объяснения массы протонов, нейтронов и тяжелых атомных ядер, то для объяснения масс W - и Z -частиц он очень важен. Для них кварковые и глюонные конденсаты в отсутствие частицы Хиггса создали бы массу примерно 1 ГэВ, но экспериментально полученные массы этих частиц примерно в 100 раз выше. БАК был предназначен для работы в энергетической зоне W - и Z -частиц, чтобы выяснить, какой механизм отвечает за их сравнительно большую массу. Что это за механизм – долгожданный бозон Хиггса или что-то такое, о чем никто и подумать не мог, – покажут только время и столкновения частиц.

Разбавим рассуждения некоторыми удивительными цифрами: энергия, заключенная в 1 м³ пустого пространства в результате конденсации кварков и глюонов, равняется невероятным 10³⁵ джоулям, а энергия в результате конденсации частиц Хиггса еще в 100 раз больше. Вместе они равняются

тому количеству энергии, которое наше Солнце производит за 1000 лет. Точнее говоря, это «отрицательная» энергия, потому что вакуум находится в более низком энергетическом состоянии, чем Вселенная, которая не содержит никаких частиц. Отрицательная энергия – это энергия связи, сопровождающая образование конденсатов и сама по себе ни в коей мере не загадочная. Она не более удивительна, чем тот факт, что для кипячения воды (и обращения фазового перехода из пара в жидкость) нужно приложить энергию.

Но загадка все же есть: такая высокая отрицательная энергетическая плотность каждого квадратного метра пустого пространства должна бы вообще-то принести во Вселенную такое опустошение, что не появились бы ни звезды, ни люди. Вселенная буквально разлетелась бы на части через мгновения после Большого взрыва. Вот что произошло бы, если бы мы взяли из физики частиц предсказания о вакуумной конденсации и непосредственно добавили их в гравитационные уравнения Эйнштейна, применив для всей Вселенной. Этот малоприятный ребус известен как проблема космологической константы^[55]. Собственно, это одна из центральных проблем фундаментальной физики. Она напоминает, что заявлять о полном понимании природы вакуума и/или гравитации надо с большой осторожностью. Пока мы не понимаем чего-то весьма фундаментального.

На этом предложении заканчиваем повествование, потому что дошли до границ нашего познания. Зона познанного – это не то, с чем работает ученый-исследователь. Квантовая теория, как мы заметили еще в начале книги, имеет репутацию сложной и откровенно странной, поскольку позволяет едва ли не любое поведение материальных частиц. Но все, что мы описали, за исключением этой последней главы, известно и хорошо понятно. Следуя не здравому смыслу, а доказательствам, мы пришли к теории, способной описать огромное количество явлений – от лучей, испускаемых горячими атомами, до ядерного синтеза в звездах. Практическое применение этой теории привело к самому важному технологическому прорыву XX века – появлению транзистора, а работа этого устройства была бы совершенно непонятной без квантового подхода к миру.

Но квантовая теория нечто гораздо большее, чем просто триумф пояснений. В результате насильно заключенного брака между квантовой теорией и относительностью в качестве теоретической необходимости появилась антиматерия, которую после этого действительно открыли. Спин – фундаментальное свойство субатомных частиц, лежащее в основе

стабильности атомов, – тоже изначально был теоретическим предсказанием, которое требовалось для устойчивости теории. А сейчас, во втором квантовом столетии, Большой адронный коллайдер отправляется в неизведанное, чтобы исследовать сам вакуум. Это и есть научный прогресс: постоянное и тщательное создание набора объяснений и предсказаний, в итоге изменяющего нашу жизнь. Это и отличает науку от всего остального. Наука – это не просто иная точка зрения, она отражает реальность, которую было бы сложно представить даже обладателю самого извращенного и сюрреалистического воображения. Наука – это исследование реальности, и если реальность оказывается при этом сюрреалистической, значит, она такая и есть. Квантовая теория – наилучший пример силы научного метода. Никто бы не смог выдвинуть ее без как можно более тщательных и подробных экспериментов, а физики-теоретики, ее создавшие, смогли отбросить свои глубоко укоренившиеся комфортные представления о мире, чтобы объяснить лежащие перед ними доказательства. Возможно, загадка вакуумной энергии – зов к новому квантовому путешествию; возможно, БАК предоставит новые и необъяснимые данные; возможно, все, что содержится в этой книге, окажется лишь приближением к гораздо более глубокой картине – удивительный путь к пониманию нашей квантовой Вселенной продолжается.

Когда мы только обдумывали эту книгу, некоторое время спорили, чем ее закончить. Хотелось найти отражение интеллектуальной и практической мощи квантовой теории, которое убедило бы даже самого скептического читателя, что наука действительно во всех подробностях отражает происходящее в мире. Мы оба согласились, что такое отражение существует, хотя и требует некоторого понимания алгебры. Мы изо всех сил старались рассуждать без тщательного рассмотрения уравнений, но здесь избежать этого никак нельзя, так что мы хотя бы предупреждаем. Итак, наша книга заканчивается здесь, даже если вам хотелось бы большего. В эпилоге – самая убедительная, на наш взгляд, демонстрация мощи квантовой теории. Удачи – и доброго пути.

Эпилог: смерть звезд

Умирая, многие звезды заканчивают свой путь в качестве сверхплотных шаров ядерной материи, переплетенной с множеством электронов. Это так называемые белые карлики. Такой будет и судьба нашего Солнца, когда оно примерно через 5 миллиардов лет исчерпает запасы ядерного топлива, и судьба еще более 95 % звезд нашей Галактики. Пользуясь только ручкой, бумагой и немного головой, можно вычислить наибольшую возможную массу таких звезд. Эти вычисления, впервые предпринятые в 1930 году Субраманьяном Чандрасекаром, с помощью квантовой теории и теории относительности позволили сделать два ясных прогноза. Во-первых, это было предсказание самого существования белых карликов – шариков материи, которые, по принципу Паули, спасает от разрушения сила собственной гравитации. Во-вторых – если мы отвлечемся от листка бумаги со всякими теоретическими каракулями и посмотрим в ночное небо, мы *никогда* не увидим белый карлик с массой, которая бы более чем в 1,4 раза превосходила массу нашего Солнца. Оба этих предположения отличаются невероятной дерзостью.

Сегодня астрономы уже занесли в каталоги около 10 000 белых карликов. У большинства из них масса составляет примерно 0,6 массы Солнца, а самая большая зафиксированная – *немногим менее* 1,4 массы Солнца. Это число – 1,4 – свидетельство триумфа научного метода. Оно опирается на понимание ядерной физики, квантовой физики и специальной теории относительности Эйнштейна – трех китов физики XX века. При его вычислении требуются также фундаментальные константы природы, с которыми мы уже встречались в этой книге. К концу эпилога мы выясним, что максимальная масса определяется отношением

$$\left(\frac{hc}{G} \right)^{3/2} \frac{1}{m_p^2} \cdot$$

Смотрите внимательно на то, что мы записали: результат зависит от постоянной Планка, скорости света, гравитационной постоянной Ньютона и массы протона. Удивительно, что мы можем предсказать

наибольшую массу умирающей звезды с помощью сочетания фундаментальных констант. Трехстороннее сочетание гравитации, относительности и кванта действия, появляющееся в уравнении $(hc / G)^{1/2}$, называется планковской массой, и при подстановке цифр оказывается, что она равна примерно 55 мкг, то есть массе песчинки. Поэтому, как ни странно, предел Чандрасекара вычисляется с помощью двух масс – песчинки и протона. Из таких ничтожных величин образуется новая фундаментальная единица массы Вселенной – масса умирающей звезды. Мы можем довольно долго объяснять, как получается предел Чандрасекара, но вместо этого пойдем немного дальше: мы опишем собственно вычисления, потому что они и есть самая интригующая часть процесса. У нас не получится точного результата (1,4 массы Солнца), но мы приблизимся к нему и увидим, как профессиональные физики делают глубокие выводы с помощью последовательности тщательно продуманных логических ходов, постоянно обращаясь при этом к хорошо известным физическим принципам. Ни в один из моментов вам не придется верить нам на слово. Сохраняя холодную голову, мы будем медленно и неотвратно приближаться к совершенно поразительным заключениям.

Начнем с вопроса: что такое звезда? Можно почти без ошибки сказать, что видимая Вселенная состоит из водорода и гелия – двух самых простых элементов, сформированных в первые несколько минут после Большого взрыва. После примерно полумиллиарда лет расширения Вселенная стала достаточно холодной, чтобы более плотные области в газовых облаках под действием собственной гравитации стали собираться вместе. Это были первые зачатки галактик, и внутри них, вокруг более мелких «комков», начали формироваться первые звезды.

Газ в этих прототипах звезд, по мере того как они коллапсировали, становился все горячее, что известно любому обладателю велосипедного насоса: при сжатии газ нагревается. Когда газ достигает температуры около 100 000 °С, электроны больше не могут удерживаться на орбитах вокруг ядер водорода и гелия, и атомы распадаются, образуя горячую плазму, состоящую из ядер и электронов. Горячий газ пытается расшириться, противодействуя дальнейшему схлопыванию, но при достаточной массе гравитация одерживает верх.

Так как протоны имеют положительный электрический заряд, они будут взаимно отталкиваться. Но гравитационный коллапс набирает силу, температура продолжает повышаться, и протоны начинают двигаться все быстрее. Со временем при температуре в несколько миллионов градусов протоны будут двигаться максимально быстро и приблизятся друг

к другу так, что слабое ядерное взаимодействие возобладает. Когда это произойдет, два протона смогут вступить в реакцию друг с другом: один из них спонтанно становится нейтроном, одновременно испуская позитрон и нейтрино (точно так, как показано на [рис. 11.3](#)). Освободившись от силы электрического отталкивания, протон и нейтрон сливаются в результате сильного ядерного взаимодействия, образуя дейтрон. При этом высвобождается огромное количество энергии, поскольку, как и в случае с образованием молекулы водорода, связывание чего-то вместе высвобождает энергию.

При одном слиянии протонов высвобождается совсем мало энергии по повседневным стандартам. Один миллион слияний пар протонов дает энергию, равную кинетической энергии комара в полете или энергии излучения 100-ваттной лампочки за наносекунду. Но в атомарном масштабе это гигантское количество; кроме того, помните, что мы говорим о плотном ядре сжимающегося газового облака, в котором количество протонов на 1 см^3 достигает 10^{26} . Если все протоны в кубическом сантиметре сольются в дейтроны, освободится 10^{13} джоулей энергии – достаточно для обеспечения годовой потребности небольшого города.

Слияние двух протонов в дейтрон – начало самого разнузданного синтеза. Сам этот дейтрон ищет возможности слиться с третьим протоном, образуя более легкий изотоп гелия (гелий-3) и испуская фотон, а эти ядра гелия затем порождают пару и сливаются в обычный гелий (гелий-4) с испусканием двух протонов. На каждой стадии синтеза высвобождается все больше энергии. Кроме того, позитрон, появившийся в самом начале цепочки превращений, тоже быстро сливается в окружающей плазме с электроном, образуя пару фотонов. Вся эта освобожденная энергия направляется в горячий газ, состоящий из фотонов, электронов и ядер, который противостоит сжатию материи и останавливает гравитационный коллапс. Такова звезда: ядерный синтез сжигает находящееся внутри ядерное топливо, образуя внешнее давление, которое стабилизирует звезду, не давая осуществиться гравитационному коллапсу.

Разумеется, когда-то водородное топливо заканчивается, ведь его количество конечно. Если энергия больше не высвобождается, прекращается внешнее давление, гравитация вновь вступает в свои права, и звезда возобновляет отложенный коллапс. Если звезда достаточно массивна, ее ядро может прогреться до температуры примерно $100\,000\,000\text{ }^\circ\text{C}$. На этой стадии гелий – побочный продукт сжигания водорода – воспламеняется и начинает свой синтез, образуя углерод и кислород, и гравитационный коллапс снова прекращается.

Но что происходит, если звезда недостаточно массивна, чтобы начался гелиевый синтез? Со звездами, масса которых менее половины массы нашего Солнца, случается нечто крайне удивительное. При сжатии звезда разогревается, но еще до того, как ядро достигает температуры 100 000 000 °С, кое-что приостанавливает коллапс. Это кое-что – давление электронов, которые соблюдают принцип Паули. Как мы уже знаем, принцип Паули жизненно необходим для понимания того, как атомы остаются стабильными. Он лежит в основе свойств материи. И вот еще одно его достоинство: он объясняет существование компактных звезд, которые продолжают свое существование, хотя уже выработали все ядерное топливо. Как же это работает?

Когда звезда сжимается, электроны внутри нее начинают занимать меньший объем. Мы можем представлять электрон звезды через его импульс p , тем самым ассоциируя его с длиной волны де Бройля, h / p . Напомним, что частица может быть описана только таким волновым пакетом, который по крайней мере не меньше связанной с ней длины волны^[56]. Это значит, что если звезда достаточно плотная, то электроны должны перекрывать друг друга, то есть нельзя считать, что они описываются изолированными волновыми пакетами. Это, в свою очередь, обозначает, что для описания электронов важны эффекты квантовой механики, в особенности принцип Паули. Электроны уплотняются до тех пор, пока два электрона не начинают претендовать на занятие одной и той же позиции, а принцип Паули гласит, что электроны не могут этого делать. Таким образом, и в умирающей звезде электроны избегают друг друга, что помогает избавиться от дальнейшего гравитационного коллапса.

Такова судьба более легких звезд. А что будет с Солнцем и другими звездами подобной массы? Мы ушли от них пару абзацев назад, когда пережигали гелий в углерод и водород. Что будет, когда гелий тоже кончится? Они тоже должны будут начать сжиматься под действием собственной гравитации, то есть электроны будут уплотняться. И принцип Паули, как и в случае с более легкими звездами, в итоге вмешается и прекратит коллапс. Но для самых массивных звезд даже принцип Паули оказывается не всемогущим. Когда звезда сжимается и электроны уплотняются, ядро разогревается, и электроны начинают двигаться все быстрее. В достаточно тяжелых звездах электроны приближаются к скорости света, после чего происходит нечто новое. Когда электроны начинают двигаться с такой скоростью, давление, которое электроны способны развивать для противостояния гравитации, понижается, и эту задачу они уже не способны решить. Они просто больше не могут бороться

с гравитацией и останавливать коллапс. Наша задача в этой главе – рассчитать, когда это произойдет, и мы уже рассказали самое интересное. Если масса звезды в 1,4 раза и больше превосходит массу Солнца, электроны терпят поражение, а гравитация выигрывает.

Так заканчивается обзор, который послужит основой наших вычислений. Теперь можно двигаться дальше, позабыв о ядерном синтезе, потому что горящие звезды лежат вне сферы наших интересов. Мы будем пытаться осознать, что происходит внутри мертвых звезд. Мы постараемся понять, как квантовое давление уплотнившихся электронов уравнивает силу гравитации и как это давление уменьшается, если электроны двигаются слишком быстро. Таким образом, суть нашего исследования – противостояние гравитации и квантового давления.

Хотя все это не так важно для последующих расчетов, мы не можем все бросить на самом интересном месте. Когда массивная звезда схлопывается, у нее остаются два варианта развития событий. Если она не слишком тяжелая, то в ней продолжится сжатие протонов и электронов, пока они не синтезируются в нейтроны. Так, один протон и один электрон спонтанно превращаются в нейтрон с испусканием нейтрино, опять же благодаря слабому ядерному взаимодействию. Подобным образом звезда неумолимо превращается в небольшой нейтронный шарик. По словам русского физика Льва Ландау, звезда становится «одним гигантским ядром». Ландау написал это в своей работе 1932 года «К теории звезд», которая появилась в печати в том самом месяце, когда Джеймс Чедвик открыл нейтрон. Наверное, слишком смело было бы сказать, что Ландау предсказал существование нейтронных звезд, но он определенно что-то подобное предчувствовал, и с большой дальновидностью. Вероятно, приоритет следует признать за Вальтером Бааде и Фрицем Цвикки, которые в 1933 году написали: «Мы имеем все основания предполагать, что сверхновые представляют собой переход от обычных звезд к нейтронным звездам, которые на конечных этапах существования состоят из чрезвычайно плотно упакованных нейтронов».

Эта идея показалась настолько нелепой, что была спародирована в Los Angeles Times (см. рис. 12.1), и нейтронные звезды до середины 1960-х годов оставались теоретическим курьезом.



Рис. 12.1. Карикатура из номера газеты Los Angeles Times от 19 января 1934 года

В 1965 году Энтони Хьюиш и Сэмюэл Окойе нашли «свидетельства необычного источника яркости радиоизлучения высокой температуры в Крабовидной туманности», хотя и не смогли опознать в этом источнике нейтронную звезду. Оpozнание случилось в 1967 году благодаря Иосифу Шкловскому, а вскоре, после более подробных исследований, и благодаря Джоселин Белл и тому же Хьюишу. Первый пример одного из самых экзотических объектов во Вселенной получил название пульсара Хьюиша – Окойе. Интересно, что та же сверхновая, что породила пульсар Хьюиша – Окойе, была замечена астрономами за 1000 лет до этого. Великая сверхновая 1054 года, самая яркая в зафиксированной истории,

наблюдалась китайскими астрономами и, как известно благодаря знаменитому наскальному рисунку, жителями каньона Чако на юго-западе современных США.

Мы пока еще не говорили о том, как этим нейтронам удается сопротивляться гравитации и препятствовать дальнейшему коллапсу, но, возможно, вы и сами в состоянии предположить, почему это происходит. Нейтроны (как и электроны) – рабы принципа Паули. Они тоже могут останавливать коллапс, и нейтронные звезды, как и белые карлики, – один из вариантов окончания жизни звезды. Нейтронные звезды, вообще-то, отступление от нашего повествования, но мы не можем не отметить, что это совершенно особенные объекты в нашей великолепной Вселенной: это звезды размером с город, настолько плотные, что чайная ложка их вещества весит как земная гора, а не распадаются они только благодаря естественной «неприязни» частиц одного спина друг к другу.

Для самых массивных звезд во Вселенной остается только одна возможность. В этих звездах даже нейтроны движутся со скоростью, близкой к скорости света. Такие звезды ждет катастрофа, потому что нейтроны не способны создавать достаточное давление, чтобы противостоять гравитации. Пока неизвестен физический механизм, не дающий ядру звезды, масса которой примерно в три раза больше массы Солнца, упасть самому на себя, и результатом становится черная дыра: место, в котором все известные нам законы физики отменяются. Предполагается, что законы природы все же продолжают действовать, но для полного понимания внутренней работы черной дыры требуется квантовая теория гравитации, которой пока не существует.

Однако пора вернуться к сути дела и сосредоточиться на нашей двоякой цели – доказательстве существования белых карликов и расчете предела Чандрасекара. Мы знаем, как поступать: необходимо уравновесить гравитацию и давление электронов. Такие вычисления нельзя сделать в уме, так что стоит наметить план действий. Итак, вот план; он довольно длинный, потому что мы хотим сначала разъяснить некоторые второстепенные детали и подготовить почву для собственно вычислений.

Шаг 1: мы должны определить, каково давление внутри звезды, оказываемое сильно сжатыми электронами. Возможно, вас заинтересует, почему мы не обращаем внимания на другие частицы внутри звезды: что насчет ядер и фотонов? Фотоны не подчиняются принципу Паули, так что со временем они все равно покинут звезду. В борьбе с гравитацией они не помощники. Что же до ядер, то ядра с полуцелым спином подчиняются принципу Паули, но (как мы увидим) из-за того, что их масса

больше, они оказывают меньшее давление, чем электроны, и их вклад в борьбу с гравитацией можно спокойно игнорировать. Это существенно упрощает задачу: все, что нам нужно, – давление электронов. На том и успокоимся.

Шаг 2: вычислив давление электронов, мы должны заняться вопросами равновесия. Может быть непонятно, что делать дальше. Одно дело сказать, что «гравитация давит, а электроны противостоят этому давлению», совсем другое – оперировать при этом числами. Давление внутри звезды будет варьироваться: в центре оно будет больше, а на поверхности меньше. Наличие перепадов давления очень важно. Представьте себе куб из звездной материи, который находится где-то внутри звезды, как показано на рис. 12.2. Гравитация направит куб к центру звезды, и мы должны понять, как будет противостоят этому давлению электронов. Давление электронов в газе оказывает воздействие на каждую из шести граней куба, и это воздействие будет равно давлению на грань, помноженному на площадь этой грани. Это утверждение точно. До того мы использовали слово «давление», предполагая, что обладаем достаточным интуитивным пониманием того, будто газ при высоком давлении «давит» больше, чем при низком. Собственно, это известно любому, кто хоть раз накачивал насосом сдувшуюся автомобильную шину.

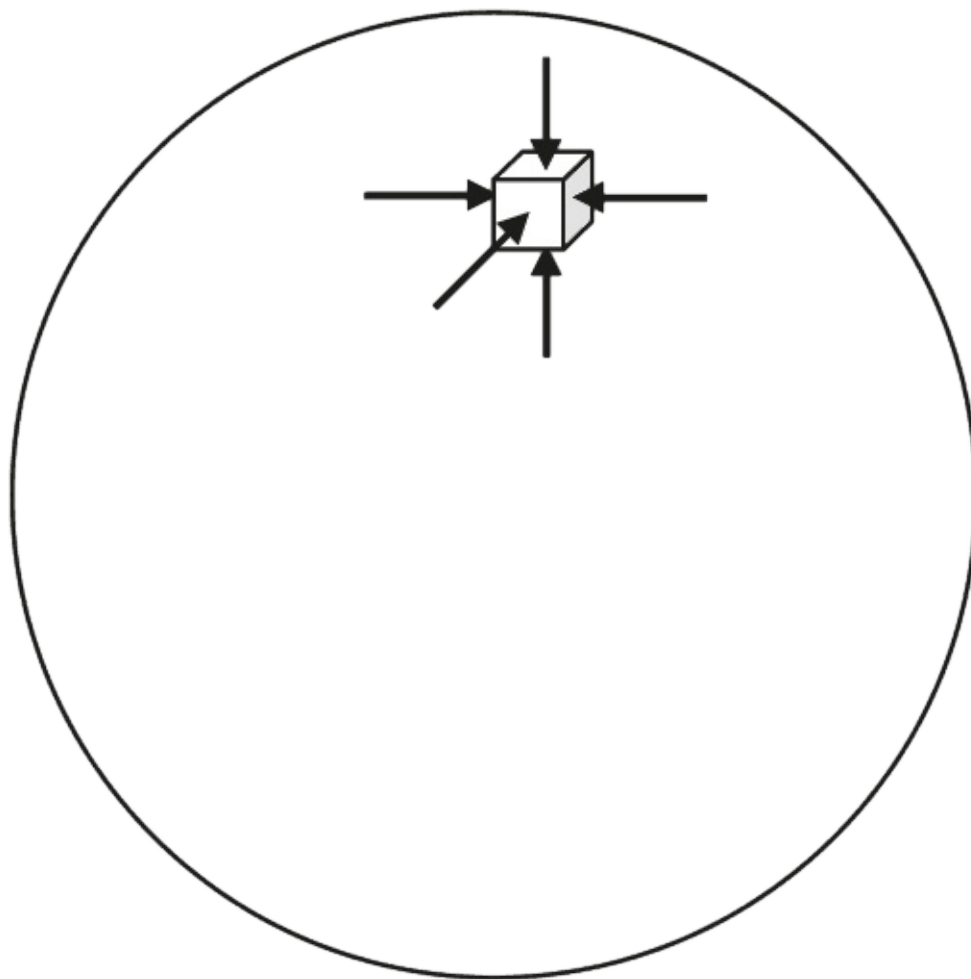


Рис. 12.2. Небольшой куб где-то в середине звезды. Стрелки показывают силу, действующую на куб со стороны электронов в звезде

Поскольку нам нужно должным образом понять природу давления, сделаем краткую вылазку на более знакомую территорию. Обратимся к примеру с шиной. Физик сказал бы, что шина сдулась, потому что внутреннего воздушного давления недостаточно, чтобы удерживать вес автомобиля без деформации шины – за это-то нас, физиков, и ценят. Мы можем не ограничиться этим и вычислить, каково должно быть давление в шинах для автомобиля с массой 1500 кг, если 5 см шины должно постоянно поддерживать контакт с поверхностью, как показано на рис. 12.3: опять настало время доски, мела и тряпки.

Если ширина шины – 20 см, а длина соприкасающейся с дорогой поверхности – 5 см, то площадь поверхности шины, находящейся в непосредственном контакте с землей, будет равна $20 \times 5 = 100 \text{ см}^2$. Требуемого давления в шине мы еще не знаем – его-то и надо вычислить, так что обозначим его символом P . Нам потребуется также знать

действующую на дорогу силу, которую прикладывает воздух в шине. Она равна давлению, помноженному на площадь шины, контактирующую с дорогой, то есть $P \times 100 \text{ см}^2$. Мы должны умножить это еще на 4, поскольку у автомобиля, как известно, четыре шины: $P \times 400 \text{ см}^2$. Такова общая сила воздуха в шинах, действующая на поверхность дороги. Представьте ее так: молекула воздуха внутри шины молотят по земле (если быть совсем уж точными, то молотят они по резине шины, которая контактирует с землей, но это не так важно).

Земля обычно при этом не проваливается, то есть реагирует с равной, но противоположной силой (ура, наконец-то нам пригодился третий закон Ньютона). Машину приподнимает земля и опускает гравитация, и, поскольку при этом она не проваливается в землю и не воспаряет в воздух, мы понимаем, что эти две силы должны уравнивать друг друга. Таким образом, можно считать, что сила $P \times 400 \text{ см}^2$ уравнивается прижимной силой гравитации. Эта сила равна весу автомобиля, и мы знаем, как вычислить его с помощью второго закона Ньютона $F = ma$, где a – ускорение свободного падения на поверхности Земли, которое равно $9,81 \text{ м/с}^2$. Итак, вес составляет $1500 \text{ кг} \times 9,8 \text{ м/с}^2 = 14\,700 \text{ Н}$ (ньютонов: 1 ньютон – это примерно $1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$, что приблизительно равно весу яблока). Так как две силы равны, то

$$P \times 400 \text{ см}^2 = 14\,700 \text{ Н.}$$

Решить это уравнение легко: $P = (14\,700 / 400) \text{ Н/см}^2 = 36,75 \text{ Н/см}^2$. Давление в $36,75 \text{ Н}$ на см^2 – возможно, не вполне знакомый нам способ выражения давления в шинах, но его можно легко преобразовать в более привычные «бары».

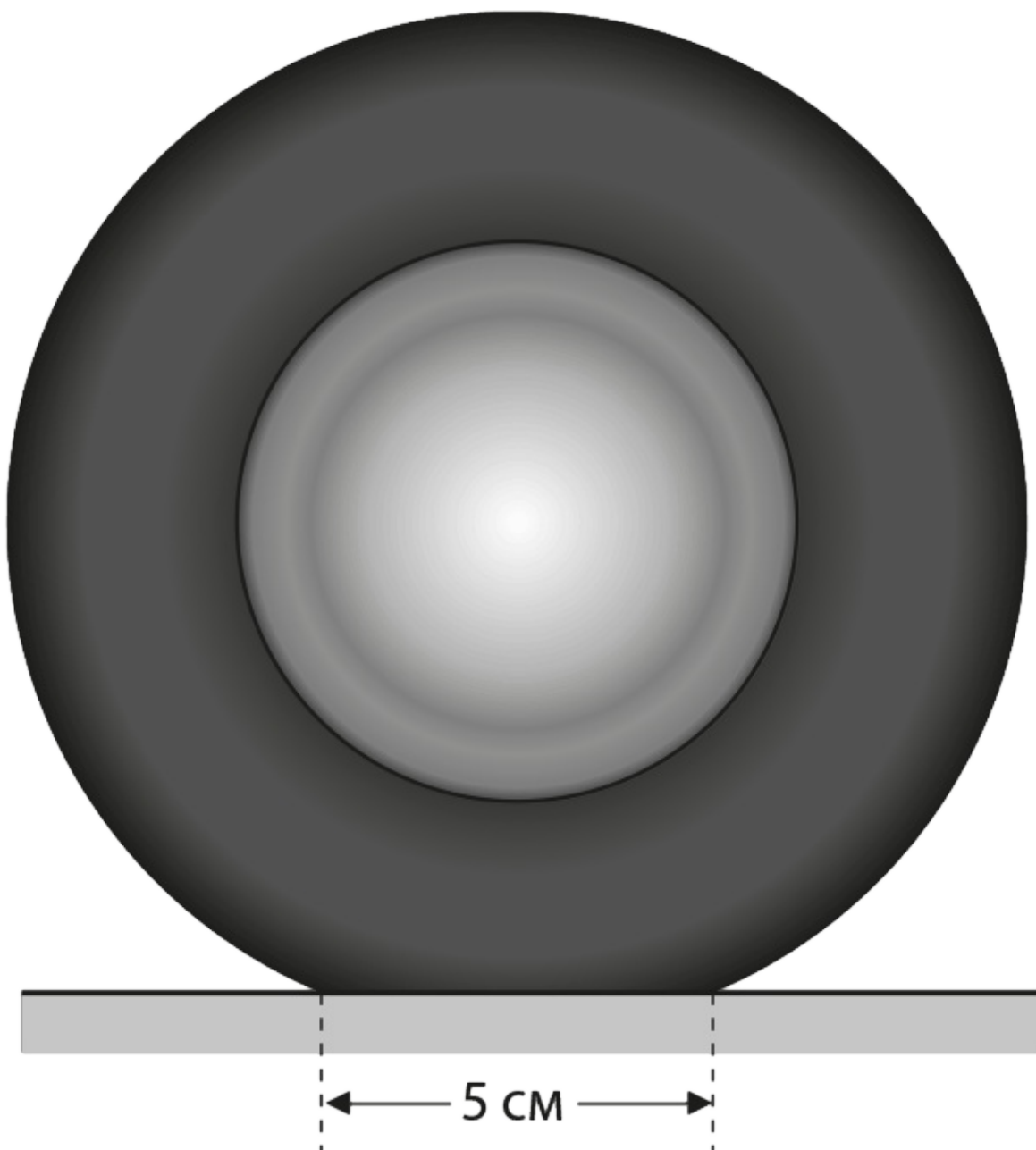


Рис. 12.3. Шина немного деформируется под весом автомобиля

Один бар – это стандартное давление воздуха, которое равно $101\,000\text{ Н на м}^2$. В 1 м^2 $10\,000\text{ см}^2$, так что $101\,000\text{ Н на м}^2$ – это $10,1\text{ Н на см}^2$. Таким образом, наше желаемое давление в шинах равняется $36,75 / 10,1 = 3,6$ бар (или 52 фунта на квадратный дюйм – это вы можете вычислить самостоятельно). С помощью нашего уравнения можно также понять, что если давление в шинах падает на 50 % до 1,8 бар, то мы удваиваем площадь шины, находящуюся в контакте с поверхностью дороги, то есть шина немного сдувается. После этого освежающего экскурса в вычисление

давления мы готовы вернуться к кубику звездной материи, который показан на рис. 12.2.

Если нижняя грань куба ближе к центру звезды, то давление на нее должно быть немного больше, чем давление на верхнюю грань. Такая разность давлений порождает действующую на куб силу, которая стремится оттолкнуть его от центра звезды («вверх» на рисунке), чего мы и хотим добиться, потому что куб в то же самое время гравитацией подталкивается к центру звезды («вниз» на рисунке). Если бы мы могли понять, как сочетать две эти силы, то улучшили бы свои представления о звезде. Но это легче сказать, чем сделать, потому что, хотя *шаг 1* позволяет нам понять, каково давление электронов на куб, все еще предстоит рассчитать, насколько велико давление гравитации в противоположном направлении. Кстати, нет нужды учитывать давление на боковые грани куба, потому что они равно удалены от центра звезды, так что давление на левую сторону уравнивает давление на правую, и куб не будет двигаться ни направо, ни налево.

Чтобы выяснить, с какой силой гравитация действует на куб, мы должны вернуться к закону притяжения Ньютона, который говорит, что каждый кусочек звездной материи действует на наш кубик с силой, уменьшающейся с увеличением расстояния, то есть более далекие куски материи давят меньше, чем близкие. Кажется, тот факт, что гравитационное давление на наш куб различно для различных кусков звездной материи в зависимости от их удаленности, представляет собой сложную проблему, но мы увидим, как обойти этот момент, по крайней мере, в принципе: мы нарежем звезду на кусочки и затем вычислим силу, которую оказывает на наш куб каждый такой кусочек. К счастью, нет необходимости представлять кулинарную нарезку звезды, потому что можно использовать отличный обходной маневр. Закон Гаусса (названный в честь легендарного немецкого математика Карла Гаусса) сообщает, что: а) можно полностью игнорировать притяжение всех кусочков, находящихся дальше от центра звезды, чем наш кубик; б) общее гравитационное давление всех кусочков, находящихся ближе к центру, в точности равно давлению, которое оказывали бы эти кусочки, если бы находились ровно в центре звезды. С помощью закона Гаусса и закона притяжения Ньютона можно сделать вывод, что к кубику прикладывается сила, которая толкает его к центру звезды, и что эта сила равна

$$G \frac{M_{in} M_{cube}}{r^2},$$

где M_{in} – масса звезды внутри сферы, радиус которой равен расстоянию от центра до куба, M_{cube} – масса куба, а r – расстояние от куба до центра звезды (G – константа Ньютона). Например, если куб находится на поверхности звезды, то M_{in} – это общая масса звезды. Для всех остальных местоположений M_{in} будет меньше.

Мы добились определенных успехов, потому что для уравнивания действий, оказываемых на куб (напомним, это значит, что куб не движется, а звезда не взрывается и не коллапсирует^[57]), требуется, чтобы

$$(P_{bottom} - P_{top}) A = G \frac{M_{in} M_{cube}}{r^2}, \quad (1)$$

где P_{bottom} и P_{top} – давление электронов газа на нижней и верхней гранях куба соответственно, а A – площадь каждой стороны куба (помните, что сила, оказываемая давлением, равна давлению, умноженному на площадь). Мы отметили это уравнение цифрой (1), потому что оно очень важно и мы к нему еще вернемся.

Шаг 3: сделайте себе чаю и наслаждайтесь собой, потому что, сделав шаг 1, мы вычислили давления P_{bottom} и P_{top} , а после шага 2 стало понятно, как именно уравновесить силы. Однако основная работа еще впереди, потому что нам нужно закончить шаг 1 и определить разницу давлений, фигурирующую в левой части уравнения (1). Это и будет нашей следующей задачей.

Представьте звезду, наполненную электронами и другими частицами. Как рассеяны эти электроны? Обратим внимание на «типичный» электрон. Мы знаем, что электроны подчиняются принципу Паули, то есть два электрона не могут находиться в одной и той же области пространства. Что это значит для того моря электронов, которое мы называем «электронами газа» в нашей звезде? Так как очевидно, что электроны отделены друг от друга, можно предположить, что каждый находится в своем миниатюрном воображаемом кубике внутри звезды. Вообще-то это не совсем верно, потому что мы знаем, что электроны делятся на два типа –

«со спином вверх» и «со спином вниз», а принцип Паули запрещает только слишком близкое расположение идентичных частиц, то есть теоретически в кубике могут находиться и два электрона. Это контрастирует с ситуацией, которая возникла бы, если бы электроны не подчинялись принципу Паули. В этом случае они не сидели бы по двое внутри «виртуальных контейнеров». Они бы распространялись и пользовались гораздо большим жизненным пространством. Собственно, если бы можно было игнорировать различные способы взаимодействия электронов друг с другом и с другими частицами в звезде, их жизненному пространству не было бы предела. Мы знаем, что происходит, когда мы ограничиваем квантовую частицу: она совершает скачок в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, и чем больше она ограничена, тем больше совершает скачков. Это значит, что, когда наш белый карлик коллапсирует, электроны все более ограничиваются и становятся все более возбужденными. Именно давление, вызванное их возбуждением, и останавливает гравитационный коллапс.

Мы можем зайти еще дальше, потому что можно применить принцип неопределенности Гейзенберга для вычисления типичного импульса электрона. Например, если мы ограничиваем электрон областью размера Δx , он будет совершать скачки с типичным импульсом $p \sim h / \Delta x$. Собственно, как мы говорили в главе 4, импульс приблизится к верхнему пределу, а типичный импульс будет равняться чему-то от нуля до этого значения; запомните эту информацию, она понадобится нам позже. Знание импульса позволяет немедленно узнать еще две вещи. Во-первых, если электроны не подчиняются принципу Паули, то они будут ограничены областью не размера Δx , а гораздо большего размера. Это, в свою очередь, означает гораздо меньшее количество колебаний, а чем меньше колебаний, тем меньше давление. Итак, очевидно, что принцип Паули входит в игру; он настолько давит на электроны, что те, в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, демонстрируют избыточные колебания. Через некоторое время мы преобразуем идею избыточных колебаний в формулу давления, но сначала узнаем, что же будет «во-вторых». Так как импульс $p = mv$, то скорость колебаний тоже имеет обратную зависимость от массы, так что электроны прыгают туда-сюда гораздо быстрее, чем более тяжелые ядра, которые тоже часть звезды. Вот почему давление атомных ядер пренебрежимо мало.

Итак, как можно, зная импульс электрона, вычислить давление, которое оказывает состоящий из этих электронов газ? Для начала нужно выяснить, какого размера должны быть блоки, содержащие пары

электронов. Наши маленькие блоки имеют объем $(\Delta x)^3$, и, поскольку мы должны разместить все электроны внутри звезды, выразить это можно в виде числа электронов внутри звезды (N), деленного на объем звезды (V). Чтобы поместились все электроны, понадобится ровно $N / 2$ контейнеров, поскольку в каждом контейнере может располагаться два электрона. Это значит, что каждый контейнер будет занимать объем V , деленный на $N / 2$, то есть $2(V / N)$. Нам неоднократно понадобится величина N / V (количество электронов на единицу объема внутри звезды), так что присвоим ей собственный символ n . Теперь можно записать, каким должен быть объем контейнеров, чтобы в нем поместились все электроны звезды, то есть $(\Delta x)^3 = 2 / n$. Извлечение кубического корня из правой части уравнения дает возможность вывести, что

$$\Delta x = \sqrt[3]{2 / n} = (2 / n)^{1/3}.$$

Теперь можно соотнести это с нашим выражением, полученным из принципа неопределенности, и вычислить типичный импульс электронов в соответствии с их квантовыми колебаниями:

$$p \sim h(n / 2)^{1/3}, (2)$$

где знак \sim означает «примерно равно». Разумеется, уравнение не может быть точным, потому что все электроны никак не могут колебаться одинаково: одни будут двигаться быстрее типичного значения, другие медленнее. Принцип неопределенности Гейзенберга не способен точно сказать, сколько электронов движутся с одной скоростью, а сколько с другой. Он дает возможность сделать более приблизительное утверждение: например, если сжать область электрона, то он будет колебаться с импульсом, примерно равным $h / \Delta x$. Мы возьмем этот типичный импульс и положим его одинаковым для всех электронов. Тем самым немного потеряем в точности вычислений, но существенно выиграем в простоте, а физика явления определенно останется той же самой^[58].

Теперь мы знаем скорость электронов, что дает достаточно информации для определения давления, которое они оказывают на наш кубик. Чтобы убедиться в этом, представьте, как целый флот электронов

движется в одном и том же направлении с одной и той же скоростью (v) по направлению к прямому зеркалу. Они ударяются о зеркало и отскакивают, двигаясь все с той же скоростью, но на сей раз в обратном направлении. Давайте вычислим силу, с которой электроны действуют на зеркало. После этого можно перейти к более реалистичным вычислениям для случаев, когда электроны двигаются в разных направлениях. Такая методология очень распространена в физике: сначала стоит поразмыслить над более простым вариантом задачи, которую хочешь решить. Тем самым можно разобраться в физике явления с меньшими проблемами и обрести уверенность для решения более серьезной задачи.

Представьте, что флот электронов состоит из n частиц на м^3 и для простоты имеет в круглом сечении площадь 1 м^2 , как показано на рис. 12.4. Через секунду nv электронов ударится о зеркало (если v измеряется в метрах в секунду).

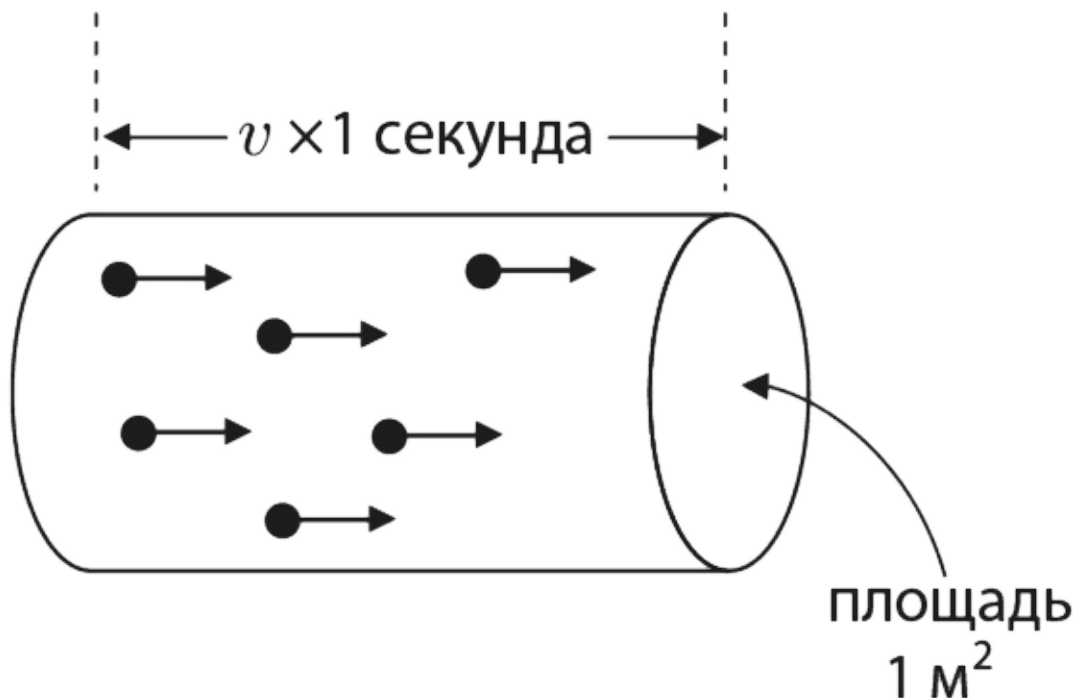


Рис. 12.4. Флот электронов (маленькие точки), движущийся в едином направлении. Все электроны в трубке такого размера будут ежесекундно ударяться о зеркало

Мы знаем это, потому что все электроны, удаленные от зеркала на расстояние $v \times 1 \text{ с}$, будут ежесекундно врезаться в зеркало. Это относится ко всем электронам в трубке, изображенной на рисунке. Поскольку объем цилиндра равен площади его поперечного сечения,

помноженной на длину, то объем трубки равен $v \text{ м}^3$, а поскольку во флоте электронов на 1 м^3 приходится n электронов, значит, каждую секунду в зеркало врезается nv электронов.

Когда каждый электрон отскакивает от зеркала, он получает обратный импульс, то есть каждый электрон изменяет свой импульс на величину $2mv$. Сила требуется как для того, чтобы остановить движущийся автобус и отправить его в противоположном направлении, так и для поворота импульса электрона. И тут вновь в игру вступает Исаак Ньютон. В главе 1 мы записали его второй закон в виде $F = ma$, но вообще-то это частный случай более общего правила, которое гласит, что сила равна изменению импульса^[59]. Итак, все электроны прикладывают к зеркалу общую силу $F = 2mv \times (nv)$, потому что именно таково общее каждую секунду изменение импульса электронов. Благодаря тому, что пучок электронов имеет площадь 1 м^2 , таково же будет и давление, оказываемое всеми электронами на зеркало.

От пучка электронов до газа, состоящего из электронов, лишь маленький шаг. Мы должны теперь учесть, что не все электроны движутся в одном направлении: какие-то движутся вверх, какие-то вниз, какие-то направо, какие-то налево и т. д. В результате мы должны разделить давление, оказываемое в любом направлении, на 6 (вспомните о шести гранях куба). Получится $(2mv) \times (nv) / 6 = nmv^2 / 3$. В этом уравнении v можно заменить типичными скоростями движения электронов, которые мы получили в предыдущем уравнении (2) благодаря принципу неопределенности Гейзенберга, и вычислить общую величину давления, которое оказывают электроны в звезде – белом карлике^[60]:

$$P = \frac{1}{3} nm \frac{h^2}{m^2} \left(\frac{n}{2} \right)^{2/3} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m} n^{5/3}.$$

Если помните, мы предупреждали, что это приблизительный результат. Полный результат, для которого требуется гораздо больше математики, таков:

$$P = \frac{1}{40} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m} n^{5/3}. \quad (3)$$

Это отличный результат. Он говорит, что давление в некотором месте звезды варьируется пропорционально количеству электронов на единицу объема в этом месте, возведенном в степень $5/3$. Не беспокойтесь о том, что мы не получили константу пропорциональности в этих приблизительных расчетах, – важно, что все сошлось. Мы тем самым сказали также, что наша оценка импульса электронов, вероятно, чуть завышена, что объясняет, почему наша оценка давления оказалась выше истинного значения.

Выражение давления через плотность электронов – хорошее начало, но нашим целям лучше соответствовало бы выразить его через истинную плотность звезды. Это можно сделать, высказав на редкость безопасное предположение, что подавляющее большинство массы звезды приходится на ядра, а не на электроны (масса протона примерно в 2000 раз больше массы электрона). Мы знаем также, что количество электронов в звезде должно равняться количеству протонов, потому что звезда электрически нейтральна. Чтобы получить массовую плотность, мы должны знать, сколько протонов и нейтронов приходится на 1 м^3 звезды, при этом о нейтронах забывать нельзя, так как это побочный продукт процесса синтеза. У более легких белых карликов ядро в основном будет состоять из гелия-4, конечного продукта водородного синтеза, а следовательно, количество нейтронов и протонов будет одинаковым. Теперь немного об условных обозначениях. Номер атомной массы A условно используется для обозначения числа протонов и нейтронов в ядре. Для гелия-4 $A = 4$.

Количество протонов в ядре мы обозначим буквой Z , для гелия $Z = 2$. Теперь можем выразить отношение между плотностью электронов n и массовой плотностью ρ :

$$n = Z\rho / (m_p A),$$

и мы предположили, что масса протона, m_p , равна массе нейтрона, что вполне достаточно для наших целей.

Величина $m_p A$ – это масса каждого ядра; тогда $\rho / m_p A$ – количество ядер на единицу объема, а Z – количество протонов на единицу объема, которое должно совпадать с количеством электронов, что и получается в уравнении.

Мы можем воспользоваться этим уравнением, чтобы заменить n

в уравнении (3), и поскольку n пропорционально ρ , то оказывается, что давление варьируется пропорционально плотности в степени $5/3$. Мы только что обнаружили существенную физическую закономерность:

$$P = \kappa \rho^{5/3}, \quad (4)$$

и не стоит слишком беспокоиться по поводу конкретных цифр, задающих общий масштаб давления, так что мы просто объединили их всех в символе κ . Стоит отметить, что κ зависит от отношения Z и A , а потому будет отличаться для разных видов звезд – белых карликов. Объединение чисел в одном символе позволяет увидеть, что здесь важно. В нашем случае символы могут отвлечь от самого существенного, а именно от зависимости между давлением и плотностью звезды.

Прежде чем мы продолжим, нужно отметить, что давление, оказываемое квантовыми колебаниями, не зависит от температуры звезды. Важна только степень ее сжатия. Давление электронов будет несколько большим, потому что электроны «нормальным образом» перемещаются благодаря своей температуре, и чем жарче звезда, тем интенсивнее они перемещаются. Об этом источнике давления мы не стали говорить, потому что мало времени, а если бы пришлось его рассчитывать, мы бы выяснили, что он ничтожен по сравнению с гораздо большим квантовым давлением.

Итак, мы наконец-то можем вставить уравнение квантового давления в ключевое уравнение (1), которое стоит здесь повторить:

$$(P_{bottom} - P_{top})A = G \frac{M_{in} M_{cube}}{r^2}. \quad (1)$$

Однако все не так просто, как кажется, потому что нужно знать еще разницу давлений на верхнюю и нижнюю грани куба. Можно полностью переписать уравнение (1) относительно плотности внутри звезды, которая сама по себе меняется от места к месту внутри звезды (иначе бы вокруг куба не существовало никакой разницы давлений), а потом попытаться решить его, чтобы определить, как плотность изменяется с расстоянием от центра звезды. Но при этом придется решать дифференциальное уравнение, а математики такого уровня мы хотим избежать. Проявим изобретательность и предпочтем подольше подумать и поменьше посчитать, чтобы применить уравнение (1) для вывода взаимосвязи между

массой и радиусом звезды – белого карлика.

Очевидно, что размер нашего кубика и его расположение внутри звезды совершенно произвольны, поэтому никакие выводы о самой звезде не могут зависеть от этих деталей. Начнем с того, что сделаем нечто совершенно бесполезное на первый взгляд.

Мы имеем возможность выразить размер и местонахождение нашего куба через размер всей звезды. Если R – радиус звезды, можно записать расстояние куба от центра звезды как $r = aR$, где a – просто безразмерное число между 0 и 1. Под безразмерностью мы понимаем то, что оно не соответствует никакой единице, это только численный показатель. Если $a = 1$, то куб находится на поверхности звезды, а если $a = \frac{1}{2}$, куб расположен строго посередине. Точно так же можно выразить размер куба через радиус звезды. Если L – длина стороны куба, мы можем записать $L = bR$, где b – это опять же только численный показатель, который должен быть очень мал, если наш куб мал относительно звезды. Здесь нет абсолютно ничего сложного, так что на этом этапе все должно казаться настолько простым, что записывать, кажется, даже бесполезно.

Заметим только, что использовать расстояние R совершенно естественно, потому что нет других относящихся к белому карлику расстояний, которые могли бы представлять сколь-нибудь разумную альтернативу.

Мы можем продолжать свои «бессмысленные» занятия и выразить плотность звезды в месте нахождения куба через среднюю плотность звезды. Запишем, что $\rho = f\bar{\rho}$, где f – опять же просто численный показатель, а $\bar{\rho}$ – средняя плотность звезды. Как мы уже указывали, плотность куба зависит от его положения внутри звезды – чем ближе к центру, тем больше плотность. Так как средняя плотность $\bar{\rho}$ от положения куба не зависит, зависимость должен обнаруживать показатель f , который, таким образом, зависит от расстояния r , а следовательно, и от произведения aR . И это ключевая информация, лежащая в основе всех наших последующих вычислений: f – это чистое число, а R – не чистое число, а результат измерения расстояния. И f может зависеть только от a , а никак не от R . Это очень важный результат, потому что он свидетельствует, что плотность белого карлика «не зависит от масштаба». Это значит, что плотность изменяется на радиусе независимо от величины этого радиуса. Например, плотность в точке, расположенной на $\frac{3}{4}$ расстояния от центра до поверхности звезды, будет совершенно одинаковой в любом белом карлике независимо от его размера. Есть два способа оценки этого исключительно важного результата, и мы решили, что приведем здесь оба.

Один из нас объясняет это так: «Дело в том, что любая безразмерная функция от r (а f – это именно она) может быть только безразмерной, так как это функция безразмерной переменной, а единственная безразмерная переменная в нашем случае – это $r / R = a$, поскольку R – единственная величина, связанная с расстоянием, из находящихся в нашем распоряжении».

Второй соавтор считает более четким следующее разъяснение: « f может в принципе по-разному сложным образом зависеть от r – расстояния кубика от центра звезды. Но давайте представим, что эти величины прямо пропорциональны, то есть $f \propto r$. Иными словами, $f = Br$, где B – константа. Здесь самое важное то, что f – чисто численный показатель, в то время как r измеряется, например, в метрах. Отсюда следует, что B должно измеряться в $1/\text{м}$, чтобы единицы расстояния взаимно сокращались. Итак, что нужно выбрать для B ? Мы не можем назначить нечто произвольное, например «1 обратный метр», поскольку это бессмысленно и никак не связано со звездой. Почему, например, не выбрать один обратный световой год, получив совершенно другой ответ? Единственное расстояние, с которым мы имеем дело, – это R , физический радиус звезды, так что придется использовать его, чтобы f всегда оставалось чистым числом. Это значит, что f может зависеть только от r / R . Вы, наверное, уже поняли, что тот же вывод можно было сделать, если бы мы начали с предположения, что, например, $f \propto r^2$ ». Собственно, ровно то же говорил и первый соавтор, только сейчас вышло длиннее.

Это значит, что можно выразить массу нашего кубика размером L и объемом L^3 , находящегося на расстоянии r от центра звезды, в виде $M_{\text{cube}} = f(a)L^3\bar{\rho}$. Мы написали $f(a)$, а не просто f , чтобы не забывать, что f на деле зависит от нашего выбора $a = r / R$, а не от каких-то масштабных свойств звезды. Тот же аргумент можно использовать при указании, что мы можем записать $M_{\text{in}} = g(a)M$, где $g(a)$ – это опять же только функция от a . Например, функция $g(a)$, высчитанная для $a = 1/2$, подсказывает, какое количество массы звезды приходится на сферу с радиусом, равным половине радиуса всей звезды, и это количество неизменно для всех белых карликов независимо от их радиуса по причине, приведенной в предыдущем абзаце^[61]. Вы могли заметить, что мы постоянно избавляемся от тех символов, которые встречаются в уравнении (1), заменяя их безразмерными величинами (a , b , f и g), помноженными на величины, зависящие только от массы и радиуса звезды (средняя плотность звезды определяется через M и R , поскольку $\bar{\rho} = M / V$ и $V = 4\pi R^3 / 3$, объем сферы). В довершение нужно сделать то же самое для разницы

давлений, которую мы благодаря уравнению (4) можем записать как $P_{bottom} - P_{top} = h(a, b)\kappa\bar{\rho}^{5/3}$, где $h(a, b)$ – безразмерная величина. То, что $h(a, b)$ зависит одновременно от a и b , связано с тем, что разница давлений зависит не только от местоположения куба (представленного a), но и от его объема (представленного b): у более крупных кубов больше разница давлений. Самое важное здесь то, что, как и $f(a)$, и $g(a)$, $h(a, b)$ не может зависеть от радиуса звезды.

Мы можем воспользоваться только что выведенными выражениями и переписать уравнение (1):

$$(h\kappa\bar{\rho}^{5/3}) \times (b^2 R^2) = G \frac{(gM) \times (fb^3 R^3 \bar{\rho})}{a^2 R^2}.$$

Кажется, что в уравнении царит хаос; непохоже, чтобы уже на следующей странице мы пришли к результату. Главное – заметить, что уравнение выражает отношения между массой звезды и ее радиусом – конкретная зависимость между ними уже нащупывается (или на виду, но чудовищно далека – в зависимости от вашего уровня владения математикой). После введения в наше хаотическое уравнение средней плотности звезды (то есть $\bar{\rho} = M / (4\pi R^3 / 3)$) оно принимает следующий вид:

$$RM^{1/3} = \kappa / (\lambda G), \quad (5)$$

где

$$\lambda = \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{2/3} \frac{bfg}{ha^2}.$$

Теперь λ зависит только от безразмерных величин a , b , f , g и h , а следовательно, не зависит от величин, которые описывают звезду в целом, M и R , а следовательно, λ должна иметь одно и то же значение для всех белых карликов.

Если вас интересует, что произойдет, если изменить a и/или b (то есть изменить местоположение и/или размеры нашего кубика), то вы упустили главное в наших аргументах. Если понимать буквально, кажется, что изменение a и b изменит и λ , так что мы получим другой результат для $RM^{1/3}$. Но ведь это невозможно, так как известно, что $RM^{1/3}$ зависит от самой звезды, а не от конкретных свойств того кубика, который мы придумали (или не придумали).

Это значит, что любые изменения a или b должны компенсироваться соответствующими изменениями f , g и h .

Уравнение (5) довольно уверенно утверждает, что белые карлики могут существовать. Дело в том, что нам удалось уравновесить уравнение гравитации-давления – уравнение (1). Это было не так-то просто: вполне могло оказаться, что уравнению не удовлетворяет ни одно сочетание M и R . Уравнение (5) также предсказывает, что величина $RM^{1/3}$ должна быть постоянной. Иными словами, если посмотреть на небо и измерить радиус и массу белых карликов, мы должны обнаружить, что радиус, помноженный на квадратный корень массы, даст один и тот же результат для любого белого карлика. Это смелое предсказание.

Только что изложенный аргумент можно еще усилить, поскольку возможно с точностью вычислить значение λ , правда, для этого придется решить дифференциальное уравнение второго порядка с учетом плотности, а такая математика лежит далеко за пределами нашей книги. Помните, что λ – это чистое число: оно значит только «то, что значит», и мы можем вычислить его с привлечением математики чуть более высокого уровня. Тот факт, что здесь мы не стали этим заниматься, не должен затмевать наших достижений: мы доказали, что белые карлики могут существовать, и сумели сделать предсказание, связанное с их массой и радиусом. После вычисления λ (которое можно выполнить на домашнем компьютере) и введения значений для k и G наше предсказание примет вид:

$$RM^{1/3} = (3,5 \times 10^{17} \text{ кг}^{1/3} \text{ м}) \times (Z / A)^{5/3},$$

что равняется $1,1 \times 10^{17} \text{ кг}^{1/3} \text{ м}$ для ядер, состоящих из чистого гелия, углерода или кислорода (где $Z / A = 1/2$). Для железных ядер $Z / A = 26/56$, так что $1,1$ сводится почти к $1,0$. Мы пролистали справочную литературу и собрали данные о массах и радиусах 16 белых карликов, расположенных в Млечном Пути, ближайшей к нам галактике. Для каждой такой звезды мы

вычислили значение $RM^{1/3}$, и результаты астрономических наблюдений показали, что оно приблизительно равно $0,9 \times 10^{17} \text{ кг}^{1/3} \text{ м}$. Соответствие между наблюдениями и теоретическими выкладками просто поразительное: с помощью принципа Паули, принципа неопределенности Гейзенберга и закона притяжения Ньютона мы сумели предсказать зависимость между массой и радиусом для белых карликов.

Разумеется, в числах есть некая приблизительность (например, теория дает 1,1 или 1,0, а результат наблюдений – 0,9). Будь у нас настоящий научный анализ, мы бы начали сейчас говорить, насколько вероятно полное соответствие теории эксперименту, но для наших целей такой аналитический уровень не столь необходим, потому что соответствие и так удивительно неплохое. Просто фантастика, что мы сумели подсчитать все это с погрешностью примерно 10 %, и это убедительное доказательство нашего приличного понимания квантовой механики и звезд.

Профессиональные физики и астрономы на этом бы не остановились. Они бы решили проверить теоретическое понимание в мельчайших подробностях, для чего следовало бы улучшить наше описание в эпилоге. В частности, уточненный анализ принял бы во внимание, что температура звезды все же играет некоторую роль в ее структуре. Более того, электроны роятся вокруг положительно заряженных атомных ядер, а в наших расчетах мы полностью пренебрегли взаимодействиями между электронами и ядрами (а заодно и между самими электронами). Мы не стали их учитывать, потому что сразу же заявили: они внесут лишь незначительные коррективы в простое решение. Это заявление было подтверждено более подробными расчетами, и вот почему наше упрощенное решение так хорошо соотносится с данными.

Очевидно, что мы узнали уже очень много нового: установили, что давление электронов способно поддерживать существование белого карлика, и сумели с определенной точностью предсказать, как меняется радиус звезды с прибавлением или снижением ее массы. Заметьте, что, в отличие от «обычных» звезд, интенсивно жгущих горючее, белые карлики парадоксальным образом уменьшаются с прибавлением массы. Это потому, что добавленная масса идет на увеличение гравитации звезды, заставляя ее сжиматься. На первый взгляд отношения, выраженные в уравнении (5), предполагают, что необходимо добавить бесконечное количество массы, прежде чем звезда сожмется до нулевого размера. Однако этого не происходит. Важно, как мы говорили в самом начале эпилога, что мы постепенно переходим в то состояние, когда электроны

размещаются очень плотно, и первостепенную важность обретает специальная теория относительности Эйнштейна, потому что скорость электронов приближается к скорости света. В результате мы должны отказаться в расчетах от законов движения Ньютона, заменив их законами Эйнштейна. В этом-то все и дело.

Мы сейчас обнаружим, что при росте массивности звезды давление, оказываемое электронами, перестает быть пропорциональным плотности, возведенной в степень $5/3$; с какого-то момента давление начинает возрастать медленнее, чем плотность. Расчеты мы проведем, но пока можно отметить, что это грозит катастрофическими последствиями для звезды. Дело в том, что при прибавлении массы обычное увеличение гравитации будет сопровождаться меньшим увеличением давления. Судьба звезды зависит от того, насколько меньшим будет это увеличение давления по сравнению с увеличением плотности, если электроны движутся быстро. Итак, настало время выяснить, каким будет давление «релятивистского» газа.

К счастью, нам не нужно выкатывать на сцену громоздкие механизмы теории Эйнштейна, потому что расчет давления в газе, который состоит из электронов, движущихся со скоростью, близкой к световой, производится почти по тем же лекалам, что и для газа, состоящего из «медленных» электронов. Ключевая разница в том, что мы не можем более опираться на уравнение $p = mv$, так как это становится некорректным. Однако по-прежнему верно, что сила, с которой действуют электроны, равна изменению их импульса. Ранее мы вывели, что флот электронов, отражающихся от зеркала, оказывает давление $P = 2mv \times (nv)$. Для релятивистского случая можно записать то же выражение, заменив mv импульсом p . Мы также полагаем, что скорость электронов близка к скорости света, так что заменяем v на c . Наконец, чтобы получить давление в звезде, нужно не забывать о делении на 6. Итак, мы можем записать давление для релятивистского газа как $P = 2p \times nc / 6 = pnc / 3$.

Как и ранее, можем воспользоваться принципом неопределенности Гейзенберга и указать, что, поскольку типичный импульс ограниченных электронов равен $h(n/2)^{1/3}$, то

$$\odot \quad P = \frac{1}{3} nch \left(\frac{n}{2} \right)^{1/3} \propto n^{4/3}.$$

Мы опять можем сравнить этот результат с точным решением, которое выглядит так:

$$P = \frac{1}{16} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/3} hcn^{4/3}.$$

Наконец, можем воспользоваться привычной методологией, чтобы выразить давление через массовую плотность звезды и вывести альтернативу уравнению (4):

$$P = \kappa' \rho^{4/3},$$

где $\kappa' \propto hc \times (Z / (Amp))^{4/3}$. Как мы и обещали, давление, аналогично плотности, увеличивается медленнее, чем в нерелятивистском случае, а именно: плотность увеличивается со степенью 4/3, а не 5/3. Причина такого замедления кроется в том, что электроны не могут двигаться быстрее скорости света. Это значит, что «векторный» показатель n , который мы использовали для вычисления давления, перенасыщается в nc , и газ не может перенести электроны к зеркалу (или грани куба), чтобы поддерживалась плотность $\rho^{5/3}$. Теперь можно изучить последствия таких изменений, поскольку с помощью тех же рассуждений, что и в нерелятивистском случае, мы можем прийти к аналогу уравнения (5):

$$\kappa' M^{4/3} \propto GM^2.$$

Это очень важный результат, потому что, в отличие от уравнения (5), здесь отсутствует какая-либо зависимость от радиуса звезды. Уравнение гласит, что звезда этого типа, переполненная очень быстрыми электронами, может иметь лишь очень конкретную массу. Введя в уравнение вместо κ' выражение из предыдущего абзаца, получим следующее предсказание:

$$M \propto \left(\frac{hc}{G} \right)^{3/2} \left(\frac{Z}{Am_p} \right)^2.$$

Об этом-то результате мы и говорили в самом начале эпилога как о максимальной массе, которую может иметь звезда – белый карлик. Мы очень близки к тому, чтобы воспроизвести результат Чандрасекара. Остается лишь понять, почему именно это конкретное значение и есть максимально возможная масса.

Мы знаем, что у не слишком массивных белых карликов радиус будет не слишком мал, а электроны – не слишком уплотнены. Таким образом, они не совершают чрезмерных квантовых колебаний, а их скорость по сравнению со скоростью света невелика. Мы знаем, что эти звезды стабильны с отношением массы и радиуса в форме $RM^{1/3} = \text{константа}$. Теперь представьте, что звезда обретает большую массу. Отношения между массой и радиусом дают понять, что при этом звезда уменьшается, и электроны в результате еще больше сжимаются, а следовательно, перемещаются быстрее. Добавим массы – и звезда еще немного уменьшится. При увеличении массы увеличивается скорость электронов, пока они со временем не начинают двигаться со скоростями, сравнимыми со скоростью света. В то же время давление постепенно изменяется с $P \propto \rho^{5/3}$ до $P \propto \rho^{4/3}$, и в последнем случае звезда будет стабильна только при конкретном значении массы. Если масса выше этого конкретного значения, то правая часть выражения $\kappa' M^{4/3} \propto GM^2$ больше, чем левая, то есть уравнение оказывается неверным. Это значит, что давления электронов (которое отражено в левой части уравнения) недостаточно, чтобы уравновесить внутреннюю гравитацию (присутствующую в правой части), и звезду ожидает неизбежный коллапс.

Если бы мы более тщательно вычисляли импульс электрона и выкатили бы на сцену высшую математику для подсчета отсутствующих цифр (опять же легкая задача для персонального компьютера), можно было бы сделать точное предсказание максимальной массы белого карлика. Она равна:

$$M = 0,2 \left(\frac{hc}{G} \right)^{3/2} \left(\frac{Z}{Am_p} \right)^2 = 5,8 \left(\frac{Z}{A} \right)^2 M_{\odot},$$

где мы выражаем множество физических констант через массу нашего Солнца (M). Заметьте, кстати, что весь дополнительный тяжкий труд, от которого мы отказались, дает в результате всего лишь константу пропорциональности со значением 0,2. Это уравнение и выражает вожделенный предел Чандрасекара: 1,4 солнечной массы, если $Z/A = 1/2$.

Итак, наше путешествие подошло к концу. Расчеты в эпилоге имели более высокий математический уровень, чем во всей остальной книге, но это, на наш взгляд, одно из самых наглядных доказательств всей мощи современной физики. Это не просто какая-то «полезная вещь» – это один из величайших триумфов человеческого разума. Мы использовали теорию относительности, квантовую механику и последовательные математические рассуждения для точного вычисления максимального размера материального шара, который с помощью принципа Паули может противостоять гравитации. Значит, наука права: квантовая механика, какой бы странной она ни казалась, – это теория для описания реального мира. И на этом месте стоит поставить точку.

Для дальнейшего чтения

При подготовке этой книги мы использовали многие другие работы, и некоторые из них заслуживают особого упоминания и рекомендаций.

Два основных источника по истории квантовой механики – это две великолепные книги Абрахама Пайса: *Inward Bound* («Связанные изнутри») и *Subtle Is the Lord...* («Господь изощрен»). Обе они носят довольно технический характер, но по историческим подробностям им нет равных.

Книга Ричарда Фейнмана QED: «КЭД – странная теория света и вещества»^[62] написана на том же уровне изложения, что и наша, и в наибольшей степени, как можно понять из названия, сосредоточена на теории квантовой электродинамики. Читать ее одно удовольствие, как и большинство работ Фейнмана.

Для тех, кто интересуется более подробным описанием, на наш взгляд, лучшей книгой по основам квантовой механики все еще остается книга Поля Дирака «Принципы квантовой механики»^[63]. Для овладения излагаемым в ней материалом потребуются высокий уровень математической подготовки.

Мы хотели бы порекомендовать и два доступных онлайн лекционных курса, которые можно найти в iTunes University: курс Леонарда Сасскинда *Modern Physics: The Theoretical Minimum – Quantum Mechanics* («Современная физика: Теоретический минимум – квантовая механика») и более продвинутый курс Джеймса Бинни из Оксфордского университета «Квантовая механика». Приличной математической базы требуют оба курса.

СНОСКИ

Если, конечно, вы читаете не электронную книгу, иначе придется поднапрячь воображение. *Здесь и далее прим. авт., если не указано иное.*

Урановые лучи (фр.). *Прим. перев.*

Правда, она не покажется такой уж смехотворной, если вспомнить, что до сих пор используется такая единица измерения, как лошадиная сила.

Когда-то эта идея использовалась в работе телевизоров. Поток электронов, испускаемых проводом под напряжением, собирался, фокусировался в луч и направлялся магнитным полем на экран, который светился при попадании электронов.

Перевод Б. Пастернака. *Прим. ред.*

Тем, кто знаком с математикой, достаточно просто сменить терминологию: «циферблат» заменяется «комплексным числом», «размер циферблата» – модулем комплексного числа, а «направление часовой стрелки» – фазой. Правило сложения циферблатов – это всего лишь правило сложения комплексных чисел.

Или эстетической – в зависимости от вашей точки зрения.

Если вам непросто понять последнее предложение, попробуйте вместо слова «циферблат» подставить слово «волна».

Кинетическая энергия равна $mv^2 / 2$, а потенциальная энергия – mgh , когда шар находится на высоте h над землей, g – это ускорение свободного падения для всех предметов в области действия земного притяжения. Действие – это разность энергий, проинтегрированная по времени между моментами, связанными с прохождением двух точек на пути.

Издана на русском языке. О наглядном содержании квантово-теоретической кинематики и механики. М.: УФН, 1977. Т. 122. Вып. 4. С. 651–671.

Деление всех циферблатов на одно и то же число верно только в том случае, если мы игнорируем эффекты специальной теории относительности Эйнштейна. Иначе некоторые циферблаты будут уменьшаться больше остальных. Но нам нет нужды беспокоиться на этот счет.

Для частицы массой m , которая покрывает расстояние x за время t , действие составляет $1 / 2m(x / t)^2t$, если частица движется по прямой с постоянной скоростью. Но это не значит, что квантовая частица действительно перемещается с места на место по прямым линиям. Правило хода часов выводится из соотнесения циферблатов со всеми возможными маршрутами, которыми частица может следовать между двумя точками, и лишь случайно после суммирования всех остальных траекторий результат оказывается настолько прост. Например, правило хода часов будет не настолько простым, если мы примем поправки для достижения соответствия специальной теории относительности Эйнштейна.

Обычная масса песчинки – около 1 мкг, то есть одна миллиардная килограмма.

Есть вероятность, что частица продвинется еще дальше, чем в «предельном» случае, ограниченном большой окружностью на рисунке, но, как мы уже показали, сложение циферблатов приводит к отмене таких сценариев.

Если хотите, проверьте сами.

Дифракция – термин, используемый для характеристики одного из видов интерференции; применяется к волнам.

Конечно, если величина d очень велика, то можно задаться вопросом, как вообще измерить импульс. Но эта проблема решается, поскольку, какой бы ни была величина d , L все равно окажется намного больше.

Вспомним о том, что изображение волн – это удобный способ зарисовки проекций стрелок часов, указывающих на 12.

Этот способ выведения принципа неопределенности, впрочем, тоже опирается на уравнение де Бройля, связывающее длину волны с ее импульсом.

В научной терминологии волновые функции пространства импульсов, соответствующие частицам с определенным импульсом, известны как собственные состояния импульсов.

Иначе говоря, наблюдаемые нами соотношения выполняются для средних значений наблюдаемых величин. *Прим. ред.*

Кобылка (бридж, подструнник) – часть гитары в самой нижней части корпуса. Некоторые модели современных звукооснимателей находятся внутри кобылки, где и считывают вибрации струн. *Прим. ред.*

Гравитационный потенциал точно соответствует карте местности, потому что вблизи земной поверхности он пропорционален высоте над уровнем моря.

Они описываются функциями Бесселя.

Это выводится из того, что энергия равна $1/2mv^2$ и $p = mv$. Эти уравнения корректируются специальной теорией относительности, но для электрона внутри атома водорода эффект невелик.

Это большой мяч, так что можно не думать о всяких квантовых эффектах, но, если такая мысль пришла вам в голову, это хороший знак: ваша интуиция становится квантовой.

Буквально авторы произносят каламбур: «There is a nice twist», где слово twist означает одновременно и «твист» (танец), что намекает на скачки, о которых шла речь перед этим, и «поворот», «завихрение». *Прим. ред.*

Впрочем, музыканты, наверное, и так не говорят, особенно барабанчики, ведь в слове «частота» целых три слога.

То есть для случая прямоугольной потенциальной ямы $n = 1$.

Кстати, если вы знаете, что для частиц, лишенных массы, $E = cp$, что считается следствием специальной теории относительности Эйнштейна, то $E = hc / \lambda$ незамедлительно выводится из этой формулы с помощью уравнения де Бройля.

Технически, как мы уже говорили в предыдущей главе, решение уравнения Шрёдингера должно быть пропорционально сферической гармонике, поскольку потенциальная яма вокруг протона сферическая и симметричная, а не прямоугольный ящик. Связанная с этим угловая зависимость порождает квантовые числа l и m . Радиальная зависимость решения дает главное квантовое число n .

Понятие спина было предложено, чтобы объяснить расщепление спектральной линии основного состояния атома серебра в магнитном поле.
Прим. ред.

В главе 10 мы узнаем, что, если брать в расчет вероятность взаимодействия двух электронов друг с другом, нужно вычислить вероятность нахождения электрона 1 в точке A и электрона 2 в точке B «сразу», потому что она не сводится к умножению двух независимых вероятностей.

В единицах постоянной Планка, деленной на 2π .

Отрывок из Нобелевской речи У. Шокли 1956 года.

Здесь мы для простоты будем игнорировать спин электрона. Сказанное верно и для двух электронов с одинаковым спином.

Помните: мы говорим о двух одинаковых электронах, так что у них одинаковый спин.

Если протоны не движутся слишком быстро относительно друг друга.

Это верно для стоячих волн, где размер циферблата и проекция на 12-часовое направление пропорциональны друг другу.

Можно решить, что есть еще четыре волновые функции, соответствующие тем, что мы начертили, но повернутые вверх ногами. Но, как мы уже говорили, они полностью эквивалентны присутствующим на рисунке.

Электронвольт – это очень удобная единица энергии при обсуждении электронов в атомах, широко используемая в ядерной физике и физике частиц. Это энергия, которую приобретает электрон при ускорении разностью потенциалов в один вольт. Само определение не имеет особого значения: важно, что это способ измерения энергии. Чтобы вы лучше могли себе представлять эту величину, скажем, что энергия, требуемая для полного освобождения электрона из основного состояния атома водорода, равна 13,6 электронвольт.

Это определение – просто вопрос условности и исторический курьез. С тем же успехом можно было бы определить ток через движение электронов в зоне проводимости.

Диод может проводить ток и в обратном направлении, но этот эффект мал. *Прим. ред.*

Пропагатор уменьшает и циферблат, чтобы во время T обеспечить нахождение частицы во Вселенной с вероятностью 1.

Мы уже встречались с этой идеей, когда рассматривали в главе 7 принцип Паули.

Это технический момент, потому что правило перевода и уменьшения циферблатов, которым мы пользуемся в этой книге, не включает в себя последствий специальной теории относительности. Если ввести их, как и нужно сделать при описании фотонов, окажется, что правила перевода часов для электронов и фотонов отличаются.

Величина g связана с прекрасной структурной константой: $\alpha = g^2 / 4\pi$.

Это технический момент: важно, чтобы электрон при движении испытывал примерно одинаковую силу магнитного притяжения.

Впервые предсказанный Бором в 1913 году.

Калибровочная инвариантность означает, что теория и ее предсказания не меняются при неких преобразованиях полей, входящих в теорию.
Прим. ред.

Под «событием» подразумевается столкновение протона с протоном. Поскольку фундаментальная физика – это счетная игра, которая имеет дело с вероятностями, необходимо продолжать сталкивать протоны, чтобы накопить достаточное количество этих очень редких событий, во время которых рождается частица Хиггса. Какое количество считать достаточным – зависит от того, насколько правильно и уверенно экспериментаторы умеют исключать из рассмотрения ложные сигналы.

То, что мы можем считать массивную частицу частицей без массы, к которой применяется правило «поворота», исходит из уравнения $P(A, B) = L(A, B) + L(A, 1) L(1, B) S + L(A, 1) L(1, 2) L(2, B) S^2 + L(A, 1) L(1, 2) L(2, 3) L(3, B) S^3 + \dots$, где S – коэффициент уменьшения, ассоциирующийся с каждым поворотом. То есть необходимо суммировать все возможные промежуточные точки – 1, 2, 3 и т. д.

Это тонкий момент, который выводится из «калибровочной инвариантности», лежащей в основе правил перехода и рассеяния для элементарных частиц.

Конечно, он был слишком скромн, чтобы назвать их своим именем.

Проблема состоит в колоссальном различии между теоретическим значением космологической константы, вычисленной исходя из вакуумных флуктуаций частиц, и ее наблюдаемым значением. *Прим. ред.*

Как мы знаем из главы 5, частицы определенного импульса на деле описываются бесконечно длинными волнами, так что мы должны разрешить некую неопределенность импульса, если хотим локализовать частицу. Но нет смысла говорить о частице с определенной длиной волны, если она локализуется на расстоянии меньше этой самой длины.

Мы можем обобщить до всей звезды, потому что не указали, где именно находится куб. Если можем доказать, что куб, расположенный в какой-то точке звезды, не движется, это значит, что все подобные кубы не двигаются и звезда стабильна.

Конечно, можно вычислить скорость движения электронов и более точно, но это потребует куда большего привлечения математики.

Второй закон Ньютона можно записать в виде $F = dp / dt$. Для постоянной массы он обретает более привычную форму: $F = mdv / dt = ma$.

Здесь мы сложили показатели степени по общему правилу: $x^a x^b = x^{a+b}$.

Задание для любителей математики: докажите, что $g(a) = 4\pi R^3 \rho \int_0^a x^2 f(x) dx$, то есть что функция $g(a)$ определяется, если известна функция $f(a)$.

Фейнман Р. Ф. КЭД – странная теория света и вещества. М.: Астрель; Полиграфиздат, 2012.

Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики. М.: Мир, 1979.