

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**, 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

* Урановые лучи (фр.). *Прим. перев.*

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.

[17]

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 Хансом 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

[18]

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.

[19]

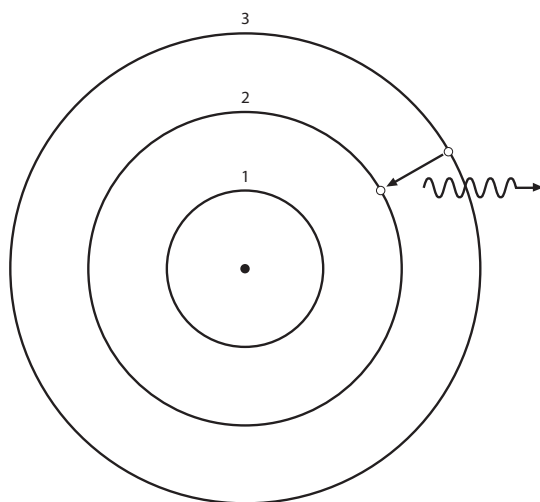


Рис. 2.1. Модель атома Бора, иллюстрирующая испускание фотона (волнистая линия) в результате перехода электрона с одной орбиты на другую (обозначен стрелкой)

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

[20]

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.

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.

[21]

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.

[22]

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 прочесть 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».

[23]

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

[24]

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.

[26]

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.

[27]

Пользуясь этой системой, которая достаточно смехотворна, чтобы ее принял любой международный комитет по стандартам*, 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

* Правда, она не покажется такой уж смехотворной, если вспомнить, что до сих пор используется такая единица измерения, как лошадиная сила.

[28]

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.

[29]

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.

[30]

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*. Мы изобразили двухщелевой эксперимент на рис. 2.2.

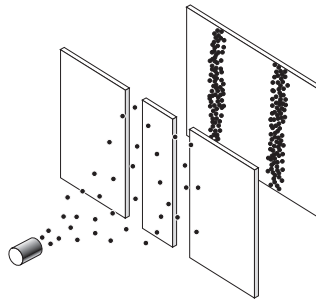


Рис. 2.2. Электронная пушка выстреливает электронами в сторону двух щелей, и если бы электроны вели себя как «обычные» частицы, то можно было бы ожидать, что на экране появится пара полосок, как показано на рисунке. Удивительно, что этого *не* происходит

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 сформируется

* 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.

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.

[31]

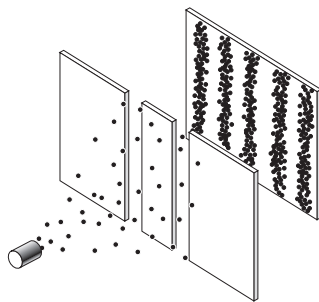


Рис. 2.3. В реальности удары электронов по экрану не связаны со щелями.

Вместо этого формируется структура из полосок, которая выстраивается постепенно, электрон за электроном

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.

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

[32]

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.

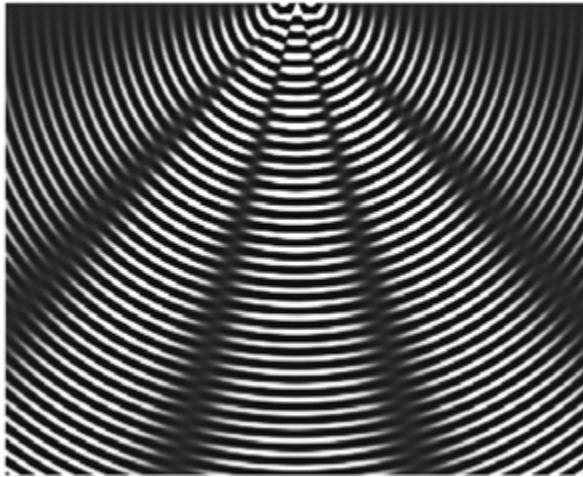


Рис. 2.4. Вид сверху на волны, возникающие из двух точек в цистерне (в верхней части рисунка). Две расходящиеся кругами волны перекрываются и интерферируют. «Спицы» — это те области, где две волны погасили друг друга, и вода осталась спокойной

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.

[33]

Довольно легко объяснить, почему такие спицы появляются в цистерне: дело в смешении 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 волн 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, вырабатывается система полосок. Это крайне удивительно, потому что

[34]

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.

[35]

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 внутрь 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,

[36]

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.