

Джим Аль-Халили
Квант

Prisma –

Медаль Стивена Хокинга

Джим Аль-Халили

КВАНТ

Странности квантового мира от кота Шрёдингера
до принципа неопределенности Гейзенберга



«Аль-Халили Дж. Квант»: Группа Компаний «РИПОЛ классик» / «Панглосс»; Москва;
2019
ISBN 978-5-386-12495-3

Аннотация

Квантовая механика – основа современной науки. И еще не было человека, который, познав ее, не испытал шок. Математически красивая, а на деле непредсказуемая теория по-настоящему расширяет сознание, разбивая в пух и прах наши бытовые представления о мире.

Книга блестящего популяризатора физики Джима Аль-Халили простым и понятным языком расскажет о прошлом, настоящем и будущем квантовой механики. Читателей ждет увлекательное путешествие от философии, физики субатомных частиц и теорий больших размерностей к сегодняшнему технологичному миру лазеров и микрочипов и завтрашнему удивительному миру квантовой магии.

Джим Аль-Халили Квант

Jim Al-Khalili
Quantum. A Guide for the Perplexed

© Jim Al-Khalili, 2003
© Мамедьяров З. А., Фоменко Е. А., перевод на русский язык, 2017
© Издание на русском языке, оформление. ООО Группа Компаний «РИПОЛ классик»,
2019

* * *

Эта книга посвящается моему отцу, которому я обязан в том числе и тем, что он первым рассказал мне о странной теории под названием «квантовая механика».

Введение

Будучи подростком, я зачитывался журналом «Необъясненное», который был полон свидетельств об НЛО, историй о Бермудском треугольнике и множестве других паранормальных явлений. Помню, как я с замиранием сердца открывал каждый новый номер, чтобы удостовериться, что мир полон странных и необъяснимых событий, которые никто не понимает. Больше всего мне нравились потрясающие фотографии, которые как будто были сделаны трясущимися руками на дешевую камеру в густом тумане темной ночью. Они якобы были свидетельствами того, что летающие тарелки, призраки и лох-несские чудовища действительно существуют. Особенно мне запомнился жуткий снимок отделившейся от тела обугленной старушечьей ноги в мягком тапке, которая лежала рядом с кучей пепла в гостиной: только это и осталось от несчастной дамочки после случая «спонтанного человеческого самовозгорания».

Понятия не имею, выходит ли этот журнал до сих пор – лично я точно давным-давно его не видел, – но людей и сейчас очаровывают всевозможные паранормальные явления, которые до сих пор не классифицированы и не разложены по полочкам традиционной

наукой. Такое впечатление, что многим нравится осознавать, что и по сей день в нашем мире существуют уголки, куда наука еще не проникла, где все еще живы магия и тайна, как будто присущие другому миру.

И это грустно. Мне кажется печальным, что все победы науки по объяснению и рационализации множества явлений нашей Вселенной порой считаются слишком обыденными, лишенными чуда. Это печалило и физика Ричарда Фейнмана, который в 1965 году стал лауреатом Нобелевской премии за свой вклад в наше понимание природы света. Он написал:

«Поэты утверждают, что наука лишает звезды красоты, говоря, что это просто скопления атомов газа. Но в этом нет ничего "простого". Я тоже вижу звезды ночью в пустыне, я тоже чувствую их. Но вижу ли я меньше или больше?... Каков узор, какова суть, почему все это? То, что я знаю об этом немного больше, ничуть не умаляет всей загадочности. Ибо гораздо более удивительно то, что об этом думали и все художники прошлого. Так почему поэты настоящего об этом не говорят?»

В наши дни, когда наука популяризируется в книгах, журналах, документальных фильмах и в Интернете, отношение к ней, как я полагаю, меняется. И все же остается одна область науки, которую невозможно полностью рационализировать, используя разговорный язык, или объяснить на пальцах. Я говорю не о спекулятивных, полусырых идеях, основанных на всяких псевдонаучных аргументах вроде экстрасенсорного восприятия или, еще того хуже, астрологии. Напротив, эта область знаний считается передовой сферой науки. На самом деле она столь вездесуща, столь фундаментальна для нашего понимания природы, что объединяет в себе значительную часть всех физических дисциплин. Она описывается теорией, открытие которой, вне всякого сомнения, стало самым важным научным прорывом двадцатого столетия. По удивительному совпадению, именно ей и посвящена настоящая книга.

Квантовая механика примечательна по двум, на первый взгляд, противоречивым причинам. С одной стороны, она столь фундаментальна для нашего понимания принципов работы этого мира, что лежит в сердце большинства технологических сдвигов последней половины XX века. С другой стороны, кажется, никто ее не понимает!

Когда речь заходит о мире кванта, мы ступаем на удивительную территорию. На территорию, где мы как будто вольны выбрать любое из множества объяснений наблюдаемых явлений, каждое из которых так поразительно, что в сравнении с ним логичными кажутся даже истории о похищении пришельцами.

Если бы только люди знали, насколько ужасно и в то же время волшебно необычен на самом деле квантовый мир, если бы они только догадывались, на каком загадочном, неопишемом фундаменте покоится наша знакомая и цельная реальность! Зачем нужны истории о Бермудском треугольнике и проделках полтергейстов, когда квантовые феномены гораздо удивительнее их? В то время как практически любой известный паранормальный инцидент можно объяснить, всего лишь обратившись к здравому смыслу, квантовую теорию тестируют, прощупывают и исследуют всеми возможными способами уже без малого сотню лет. Жаль, что ни одна из гипотез квантовой механики ни разу, насколько мне известно, не попала на страницы «Необъясненного».

Стоит сразу пояснить, что странной и нелогичной кажется не сама теория квантовой механики. Напротив, она представляет собой потрясающе точную и логичную математическую конструкцию, которая превосходно описывает Природу. На самом деле без квантовой механики мы не смогли бы понять основы современной химии, электроники и материаловедения. Без квантовой механики мы не изобрели бы ни кремниевый чип, ни лазер; не было бы ни телевизоров, ни компьютеров, ни микроволновых печей, ни CD – и DVD-плееров, ни мобильных телефонов, ни многих других устройств, которые мы в наш технологический век принимаем как должное.

Квантовая механика невероятно точно предсказывает и объясняет поведение самих кирпичиков материи – не только атомов, но и частиц, из которых они состоят. Она дает нам очень точное и практически полное понимание того, как субатомные частицы взаимодействуют друг с другом и соединяются, чтобы формировать мир, который мы видим вокруг и частью которого являемся сами.

Таким образом, перед нами встает противоречие: как может научная теория столь успешно объяснять все эти «как» и «почему» и в то же время оставаться столь загадочной?

Большинство практикующих физиков, которые ежедневно применяют правила и математические формулы квантовой механики, скажут, что они не видят в этом проблемы. В конце концов, они знают, что она работает. Она помогла нам объяснить огромное количество природных явлений, ее математический аппарат и формулировка точны и понятны и, несмотря на многократные попытки сомневающихся в их правильности, блестяще выдержали все возможные экспериментальные проверки, которым их подвергли. И правда, физики нередко сетуют на тех своих коллег, которые до сих пор не могут смириться с парадоксальной и необычной природой субатомного мира, сообщаемого нам теорией. К тому же какое право мы имеем ожидать, что природа на уровне невообразимо крохотных атомов будет вести себя хоть сколько-нибудь знакомо, когда мы ежедневно видим лишь ее поведение на уровне людей, машин, деревьев и домов? Дело не в том, что квантовая механика представляет собой странное описание Природы, а в том, что сама Природа ведет себя необычным и парадоксальным образом. А если квантовая механика дает нам теоретические инструменты, чтобы понять все, что мы наблюдаем, у нас нет никакого права винить Природу – или теорию – за наши интеллектуальные несовершенства.

Многие физики нетерпимы к тем, кто пытается найти более наглядную интерпретацию квантовой механики. В моем понимании, их подход ненаучен. Они говорят: «Может, просто заткнетесь и начнете использовать квантовые инструменты, чтобы предсказывать результаты экспериментов? Искать полное понимание того, что невозможно проверить экспериментальным путем, – пустая трата времени».

На самом деле стандартная интерпретация квантовой механики – та самая, которой обычно обучают всех студентов-физиков, – вывела строгие правила и условия, которых физики должны придерживаться в отношении той информации, которую они извлекают из Природы в каждом конкретном эксперименте. Понимаю, на первых страницах книги это покажется неуместно туманным, однако вы с самого начала должны осознавать, что квантовая механика не похожа ни на одну другую теоретическую концепцию, созданную человеком за всю историю науки.

Как и большинство физиков, я много лет рассуждал о квантовой механике и с профессиональной позиции практикующего исследователя, и с позиции человека, заинтересованного в ее более глубоком значении – в области, известной как основы квантовой механики. Быть может, тех двадцати лет, которые я провел с квантовой механикой, еще недостаточно, чтобы «смириться» с ней. Но я полагаю, что слышал достаточно мнений (а спор, поверьте мне, еще далек от завершения, несмотря на оптимистичные и несколько неискренние заверения сторонников конкретной интерпретации в обратном), чтобы хотя бы взглянуть на нее со стороны. Надеюсь, большая часть вопросов, освещаемых в этой книге, не вызовет противоречий, а при описании того, «что происходит сейчас», я постараюсь занять нейтральную и объективную позицию. Я не поддерживаю какую-то конкретную интерпретацию квантовой механики, но понимаю их. Вы, само собой, вольны не соглашаться со мной, но я не сомневаюсь, что смогу склонить вас на свою сторону, если, конечно, вы не один из тех, кто вечно кричит «заткнись и считай», хотя в этом случае вам не стоит читать эту книгу, ведь у вас есть дела и поважнее!

Пока что я скажу лишь, что моя любимая версия интерпретации называется «заткнись, пока считаешь». Она позволяет мне не переживать о квантовой механике, пока я применяю ее на практике.

Но эта книга рассказывает не только о значении квантовой механики. Она также

описывает ее успехи как в объяснении огромного количества феноменов, так и во множестве способов ее применения в нашей повседневной жизни в прошлом, настоящем и будущем. Таким образом, я вместе с вами отправлюсь в путешествие от философии, физики субатомных частиц и теорий больших размерностей к сегодняшнему технологичному миру лазеров и микрочипов и завтрашнему удивительному миру квантовой магии.

Однако, хоть я и надеюсь, что это звучит захватывающе, новичку в этой области вполне естественно спросить, к чему такая шумиха. Странную природу квантовой механики можно продемонстрировать разными способами – и на примерах из жизни, которые всем нам знакомы и которые мы воспринимаем как должное, и с помощью «мысленных экспериментов», то есть идеализированных опытов, которые нет необходимости проводить в лаборатории, чтобы получить результат. И нет ничего, что бы так прямолинейно и так прекрасно описывало таинственную сущность квантовой механики, как эксперимент с двумя прорезями. С него мы и начнем.

Глава 1. Фокус природы

Вместо того чтобы сыпать научными терминами на первых же страницах этой книги, я сначала опишу простой эксперимент. Позволю себе предположить, что он покажется вам настоящей магией. Вы можете мне не поверить – тут уж вам решать. Любой фокусник оберегает свои секреты, так что я не стану сразу объяснять вам, как именно и почему это происходит. Однако, в отличие от случая с фокусами, узнавая о квантовом мире все больше, вы постепенно поймете, что здесь дело не в ловкости рук, не в спрятанных зеркалах и не в потайных перегородках. На самом деле вы должны прийти к выводу, что рационального объяснения описываемому мной положению вещей просто не существует.

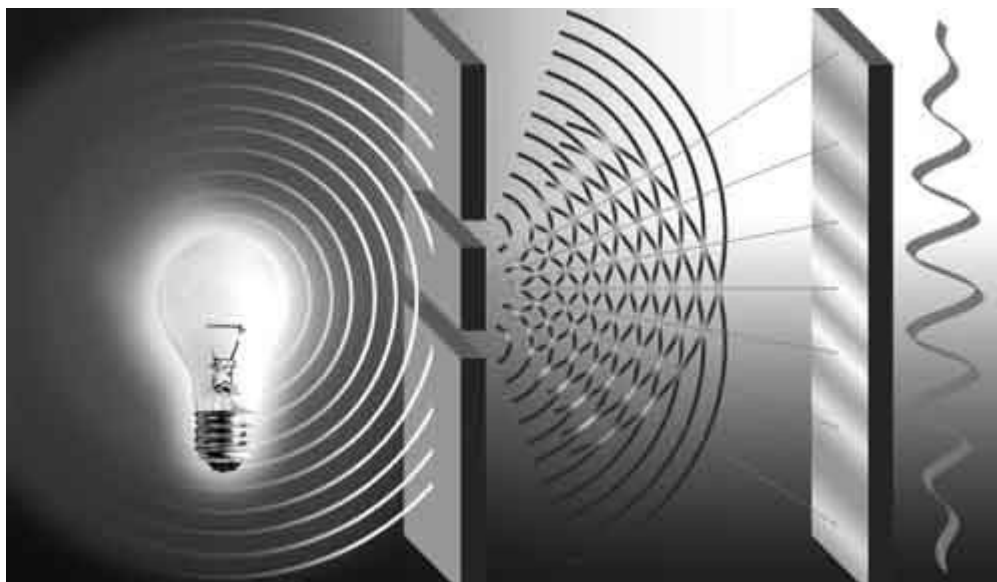
Поскольку я уже и так слишком много раз использовал прилагательные «странный», «загадочный» и «удивительный», я больше не буду тратить время на предисловия и перейду к делу. Я собираюсь описать настоящий эксперимент, и вам придется поверить, что наблюдаемое – это не просто теоретические спекуляции. Провести этот эксперимент при наличии должного оснащения несложно; к нему прибегали неоднократно и по-разному. Также важно уточнить, что я опишу эксперимент не с позиции человека, который понимает квантовую физику, а с позиции читателя, который еще не знает, чего ожидать и как принять поразительные результаты. Полагаю, вы попытаетесь осознать их с точки зрения логики, опираясь на тот свод правил, которые считаете здравым смыслом, однако квантовые физики объясняют все иначе. Но об этом позже.

Прежде всего стоит сказать, что фокус – с вашего позволения я все же пока буду называть его фокусом – можно повторить, просто направив луч света на специальный экран; именно так эту процедуру и описывают во многих текстах. Однако в действительности природа света и сама по себе довольно необычна, из-за чего эффект становится не столь драматичным. В школе нас учат, что свет ведет себя, как волна, и может состоять из волн разной длины (что и дает разные цвета спектра, которые мы видим в радуге). Он демонстрирует все свойства, характерные для волн, включая интерференцию (наложение двух волн), дифракцию (рассеивание волн при прохождении сквозь узкое отверстие) и рефракцию (искажение волн при прохождении сквозь разные прозрачные субстанции). Эти феномены связаны с тем, как волны ведут себя, когда встречаются на своем пути препятствия или когда встречаются друг с другом. Я же упомянул о необычной природе света потому, что его волновое поведение не описывает всей картины. На самом деле Эйнштейн получил Нобелевскую премию, показав, что свет может демонстрировать совсем не волновое поведение, но подробнее об этом мы поговорим в следующей главе. Для эксперимента с двумя прорезями достаточно предположить, что свет является волной, так как в этом случае все складывается как нельзя интереснее.

Сначала пучок света направляется на экран с двумя узкими прорезями, которые позволяют части света проникнуть сквозь них и упасть на второй экран, где наблюдается

картина интерференции. Эта последовательность светлых и темных полос возникает в результате того, что отдельные световые волны, проникающие сквозь прорезы, рассеиваются, накладываются друг на друга и сливаются, прежде чем попасть на задний экран. Там, где два гребня (или две впадины) волн встречаются, они сливаются вместе и образуют более высокий гребень (или более глубокую впадину), который соответствует более интенсивному свету и, следовательно, более яркой полосе на экране. Но там, где гребень одной волны встречается с впадиной другой, они взаимоисключают друг друга, в результате чего на экране появляется темная полоса. Некоторое количество света между этими двумя крайностями сохраняется, поэтому рисунок на экране получается несколько размытым. Следовательно, интерференция наблюдается исключительно потому, что свет ведет себя, как волна, и проникает одновременно через обе прорезы. Надеюсь, здесь вопросов еще нет.

Подобный эксперимент можно провести с использованием песка. На этот раз второй экран располагается под первым и в дело вступает гравитация. Когда песок падает на верхний экран, на нижнем экране под прорезями образуются две отдельные кучки. В этом нет ничего удивительного, ведь каждая песчинка должна пройти либо сквозь одну, либо сквозь другую прорезь; в этом случае волн нет, а следовательно, не происходит и интерференции. Если прорезы одинаковы по размеру, а песок на верхний экран высыпается ровно между ними, две кучки песка на нижнем экране будут одинаковы по высоте.

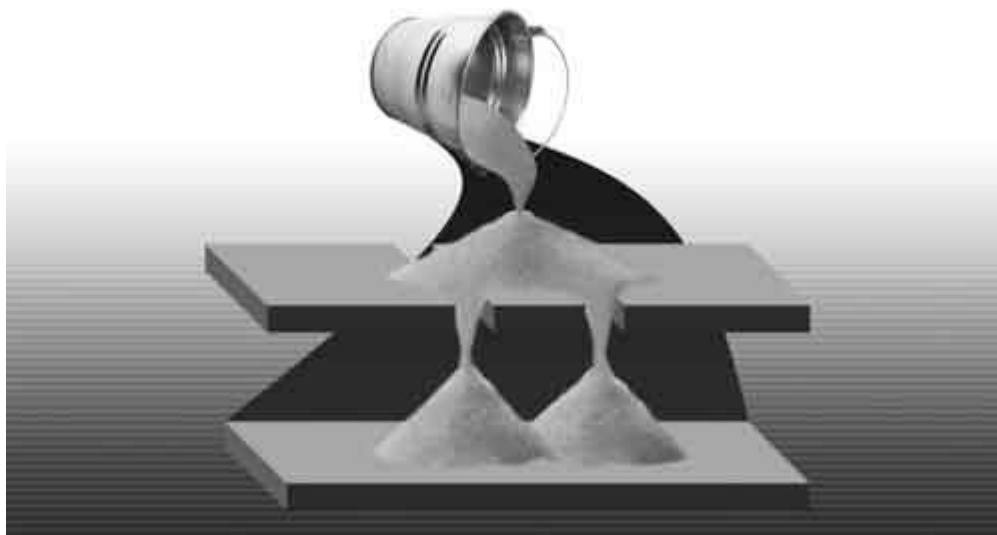


Проникая сквозь две узкие прорезы, свет формирует полосы на экране вследствие интерференции световых волн, проходящих сквозь прорезы. Само собой, это происходит, только если источник света «монохромный» (то есть дает свет с одинаковой длиной волны).

И тут мы переходим к самому интересному – пробуем повторить тот же фокус с атомами. Специальный аппарат – за неимением лучшего имени назовем его атомной пушкой – выстреливает пучок атомов на экран с двумя достаточно узкими прорезями¹. Второй экран покрывается специальным слоем, на котором вспыхивают крошечные огоньки, когда атом касается его.

Конечно, не стоит и говорить, что атомы представляют собой мельчайшие частицы, а следовательно, должны вести себя подобно песку, а не подобно распространенным волнам, которые могут проходить одновременно сквозь обе прорезы.

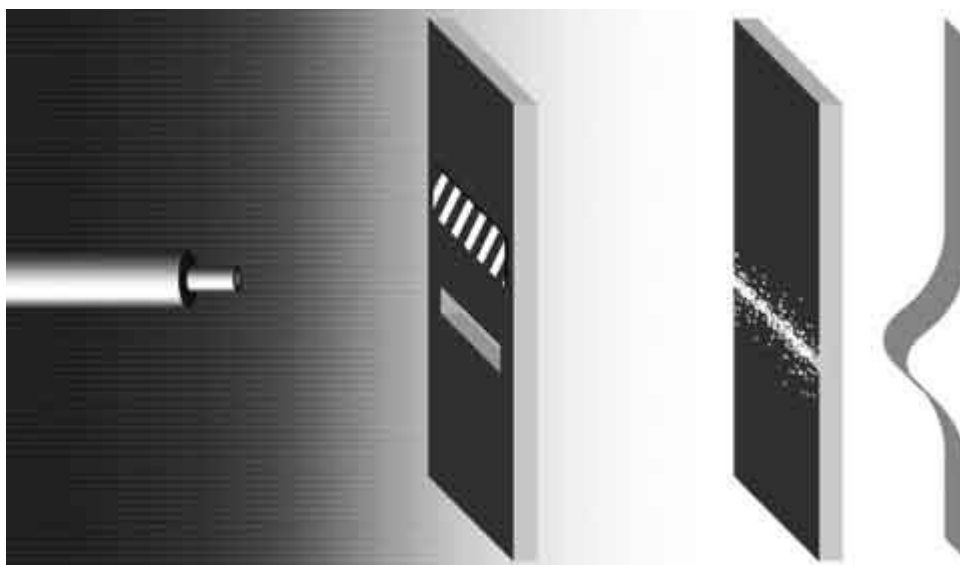
¹ Для этого эксперимента прорезы действительно должны быть очень узкими и расположенными близко друг к другу. Такие эксперименты действительно проводились в 1990-х годах: в них использовался экран из золотой фольги с прорезями шириной один микрометр (одну тысячную миллиметра).



Песчинки, само собой, не *ведут* себя, как волны, и формируют под прорезями две отдельные кучки.

Сначала мы проводим эксперимент, открыв только одну прорезь. Вполне ожидаемо на заднем экране за этой прорезью вспыхивают несколько отстоящие друг от друга огоньки. Это небольшое рассеивание огоньков может озаботить вас, если вы уже кое-что знаете о волновом поведении, ведь именно это происходит с волной, проходящей сквозь узкую прорезь (дифракция). Однако мы тут же заверяем себя, что волноваться пока не стоит, поскольку некоторые атомы могли задеть края прорези и отлететь в сторону, вместо того чтобы пройти прямо насквозь, что и может объяснить их рассеивание.

Далее мы открываем вторую прорезь и ожидаем, когда на экране появятся огоньки. Если бы я сейчас попросил вас предположить, как они распределятся на этот раз, вы бы, само собой, сказали, что они будут напоминать две кучки песка. Иначе говоря, что за каждой из прорезей образуется скопление огоньков, два отдельных световых пятна, более ярких в центре и постепенно меркнущих к периферии, куда атомы будут попадать реже. Расстояние между двумя световыми пятнами будет темным, соответствуя той области экрана, достичь которой атомам одинаково сложно, сквозь какую из прорезей они бы ни пролетали.



Теперь повторим тот же фокус с атомами. Когда одна из прорезей закрыта, атомы проходят только сквозь открытую прорезь. Распределение точек на заднем экране показывает, куда попали атомы. Хотя незначительный разброс и объясняется волновым свойством под названием дифракция, мы все же можем утверждать, что атомы ведут себя, как частицы, и

результат эксперимента аналогичен тому, что мы видели в случае с кучками песка.

Что ж – сюрприз! – атомы ведут себя иначе. Вместо двух световых пятен мы видим картину интерференции, составленную светлыми и темными полосами, прямо как в случае со светом. И самой яркой частью экрана – хотите верьте, хотите нет – становится центр, где мы вообще не ожидали увидеть ни одного атома!

Мы можем попытаться объяснить, как это происходит. Хотя атом представляет собой крошечную локализованную частицу (в конце концов, каждый атом ударяется об экран в одной конкретной точке), потоки атомов как будто тайком договариваются друг с другом вести себя подобно волне. Атомы омывают первый экран, после чего те, которые сумели проникнуть сквозь прорези, «интерферируют» с путями друг друга посредством атомных сил таким образом, который в точности повторяет картину, получаемую при наложении друг на друга гребней и впадин двух волн. Возможно, атомы сталкиваются особым, согласованным путем и таким образом направляют друг друга на экран. Казалось бы, атомы совершенно не похожи на распространенные волны (такие как волны света и звука или водяные волны), но, вероятно, нам не следует и ожидать, что они будут вести себя в точности как песчинки.

Вот здесь земля и уходит у нас из-под ног. Начнем с того, что узор полос на заднем экране каким-то образом связан с тем, как интерферируют две волны. Как и в случае с обычными волнами, детали этой картины зависят от ширины прорезей, расстояния между ними и между экранами.

Само по себе это не является доказательством того, что атомы ведут себя подобно волнам. Однако эксперимент с двумя прорезями не только проводился с атомами, он проводился и в таких условиях, когда отдельные атомы выпускались по одиночке! Иначе говоря, новый атом выпускался только в тот момент, когда на заднем экране уже вспыхивал огонек, сигнализирующий о попадании предыдущего, и так далее. Таким образом в каждый момент времени через наш аппарат проходит лишь один атом. Каждый атом, которому удастся пройти сквозь прорезь, оставляет крошечный огонек в некотором месте экрана. На практике большая часть атомов не проходит сквозь узкие прорези первого экрана, но нам интересны лишь те, которые все же пролетают сквозь них.

Наблюдаемое невероятно. Огоньков постепенно становится все больше, а там, где они располагаются особенно плотно, проявляются световые полосы картины интерференции. Между этими полосами возникают темные области, куда попадает очень мало атомов или не попадает вовсе.

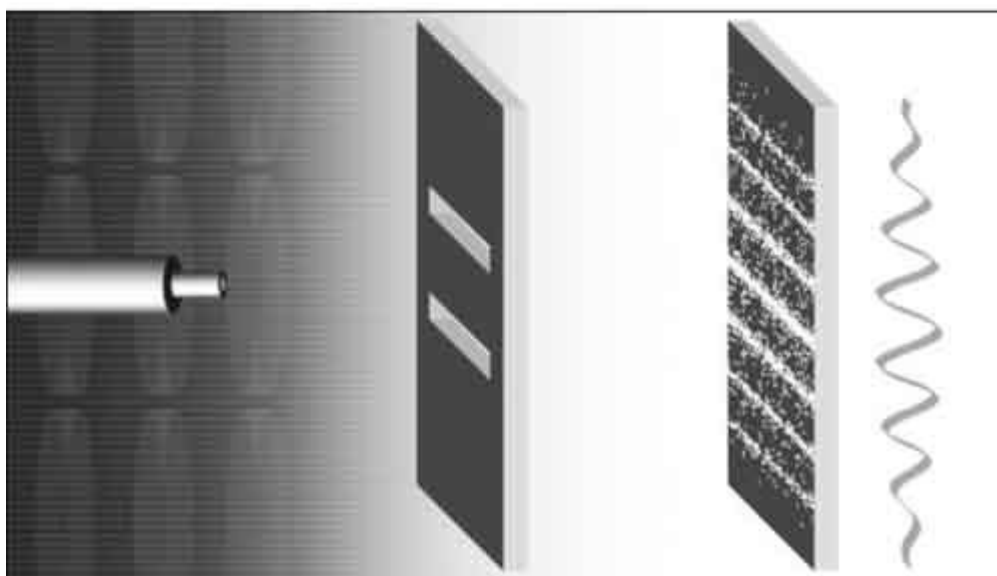
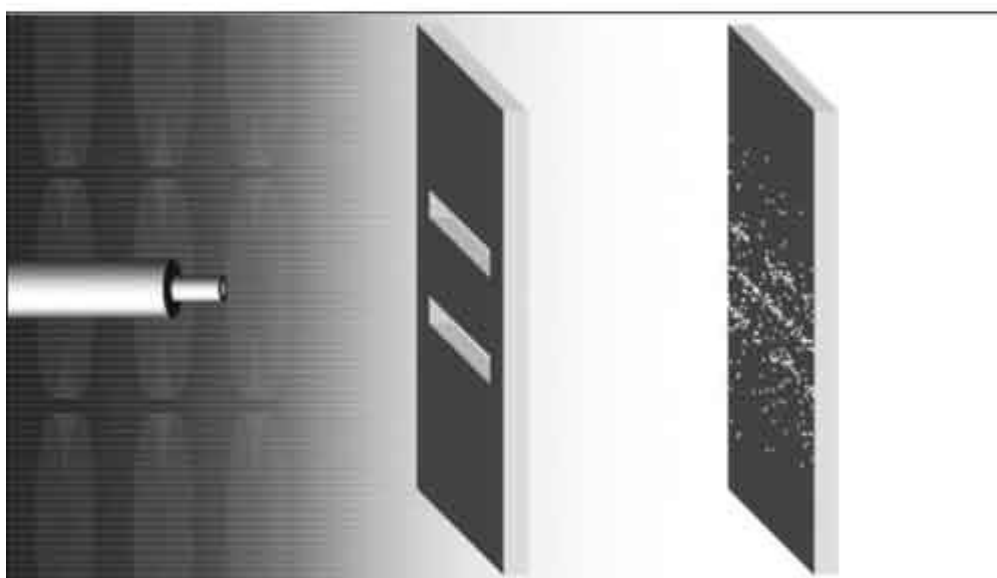
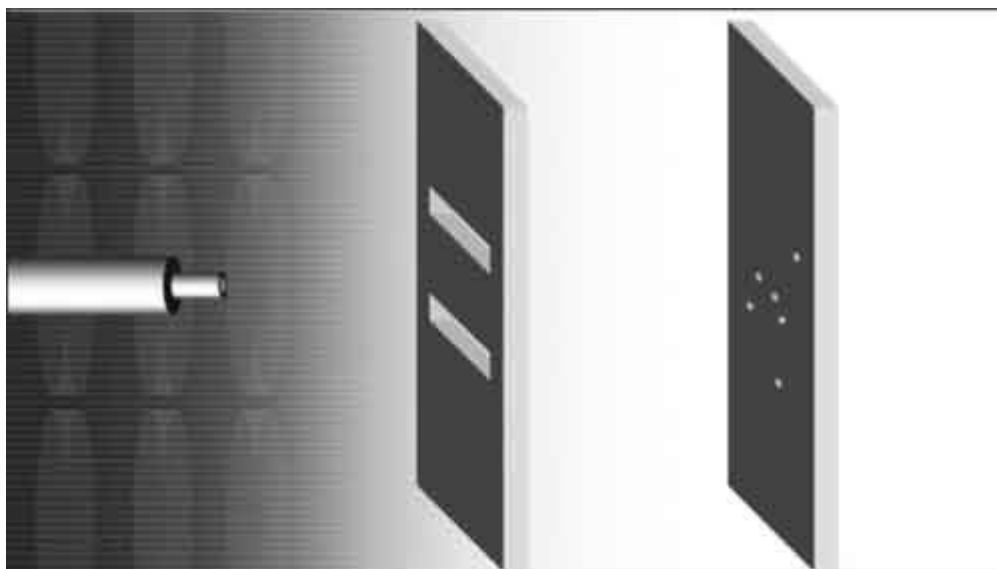
Казалось бы, мы уже не можем утверждать, что атомы, пролетающие сквозь одну прорезь, сталкиваются с атомами, пролетающими сквозь другую. Картина интерференции не может быть результатом коллективного поведения. Так что тогда происходит? Особенно примечательным этот результат делает то, что на втором экране существуют области, куда атомы попадают, когда открыта только одна из прорезей. Открывая вторую прорезь, мы предоставляем атомам другой маршрут и ожидаем, что шансы на попадание атомов в эти области увеличатся. Однако, когда открыты обе прорези, атомы вообще не попадают туда. А значит, если атом действительно проходит только через одну прорезь, он должен каким-то образом понимать, открыта ли вторая, и действовать соответственно!

Получается, что каждый атом, выстреливаемый из пушки, покидает ее в качестве крошечной «локализованной» частицы и попадает на второй экран тоже в качестве частицы, что подтверждается крошечным огоньком, который загорается, когда атом достигает места своего назначения. Но между этими событиями, в процессе прохождения сквозь прорези, с ним происходит что-то загадочное, подобное поведению распространенной волны, которая делится на две части, проходящие сквозь разные прорези и интерферирующие друг с другом по другую сторону первого экрана. Как иначе нам объяснить, как атом знает о существовании обеих прорезей?

Когда я показывал фокусы на днях рождениях своих детей – теперь мои дети стали уже слишком большими для таких глупостей, – среди гостей всегда находилась парочка умников,

которые утверждали, что знают все мои секреты. Они требовали, чтобы я позволил им заглянуть к себе в рукава, за ширму и под стол, надеясь подловить меня на чем-то. Такое поведение обычно раздражает, но для научных экспериментов оно даже полезно. Так что давайте заглянем природе в рукав и притаимся за одной из прорезей, чтобы проследить, как на самом деле ведут себя атомы. Для этого можно установить за одной из прорезей детектор атомов, который ловит все атомы, проходящие сквозь нее. В результате мы увидим, что детектор время от времени будет ловить атомы, но ни разу не поймает часть атома. В ином случае мы могли бы сказать, что «оставшаяся часть атома» проходит сквозь другую прорезь. Конечно, иногда атомы будут проходить через другую прорезь и оставлять огоньки на втором экране. Само собой, распределение этих огоньков не будет показывать нам картину интерференции, потому что атомы снова будут проходить лишь сквозь одну прорезь, как и в первой части эксперимента, когда только одна прорезь была для них открыта. Вот только теперь, вместо того чтобы закрыть вторую прорезь, мы детектором поймали все атомы, которые прошли сквозь нее.

Наверное, вы уже начинаете сомневаться в истинности моих слов. Одно дело, когда атомы магическим образом превращаются из крошечных частиц в распространенные волны, встречая на своем пути два возможных маршрута прохождения сквозь первый экран. Может, здесь происходит еще не объясненный физический процесс. Однако совсем другое дело предположить, что атом каким-то образом знает о детекторе, который спрятан за одной из прорезей и готов поймать его в рассеянном состоянии. Такое впечатление, что он заранее знает, что мы лежим в засаде и караулим его, а потому он хитрит и остается в форме частицы!



Открыты обе щели, а атомы выстреливаются по одному за раз. Каждый следующий выпускается только тогда, когда на втором экране загорается огонек. Кажется, что каждый атом ударяется в произвольное место экрана и сначала нет никакого очевидного паттерна. Постепенно количество огоньков увеличивается, и мы начинаем видеть картину

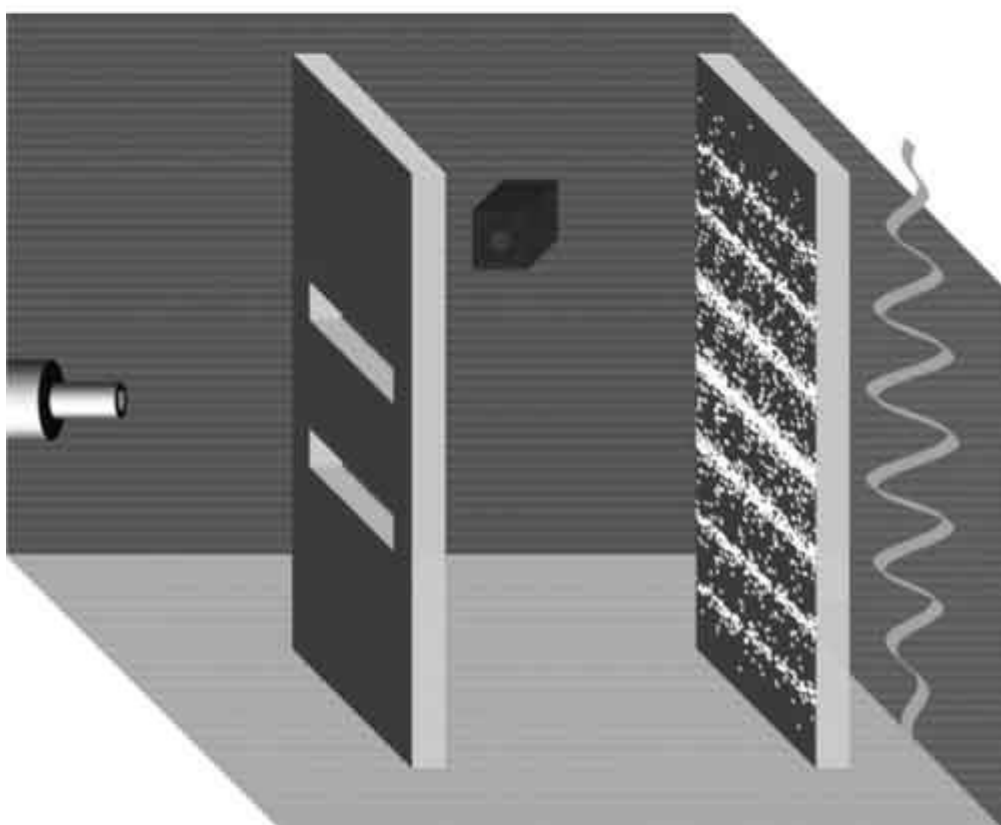
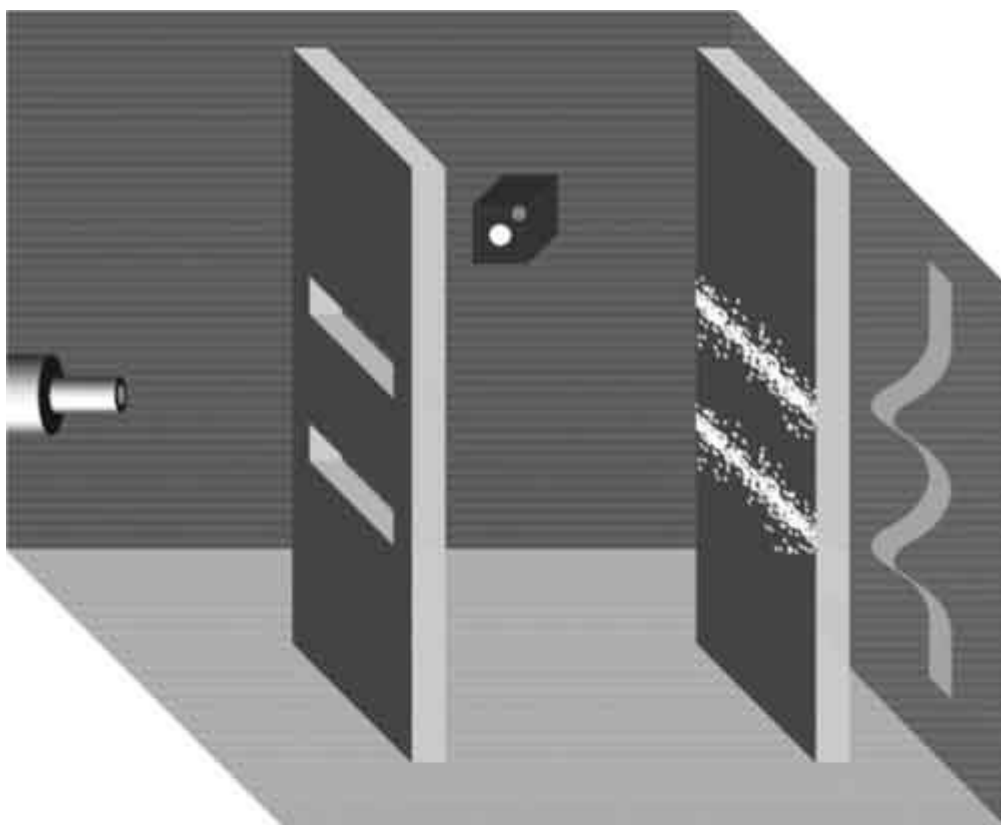
интерференции. Что происходит? Неужели атомы сговорились между собой, чтобы образовать эту картину, которая является результатом волнового поведения? Такое впечатление, что каждый атом с большей вероятностью ударяется в одни области, чем в другие. Очевидно, что в перемещении одного атома задействован какой-то волнообразный процесс. Но картина интерференции возникает только тогда, когда волна проходит сквозь обе прорези. Как крошечный атом, который вылетает из пушки в качестве локализованной частицы и в определенном месте ударяется о второй экран, проходит одновременно сквозь обе прорези?

Но даже здесь мы на самом деле ничего не добавили к изначальным условиям. Вероятно, детектор обладает способностью превращать рассеянную «волну» атома обратно в локализованную частицу, точно так же, как это делает второй экран, когда атом достигает его.

Детектор можно настроить и менее агрессивным образом, чтобы он просто регистрировал «сигнал», когда атом проходит сквозь наблюдаемую прорезь на пути к экрану. Если атом не регистрируется детектором, но на втором экране появляется огонек, это означает, что атом прошел сквозь другую прорезь². Само собой, я говорю упрощенно: позднее мы увидим, что детектор не может зарегистрировать сигнал, не работая с должной степенью агрессивности.

Вы можете подумать, что у нас наконец появилось доказательство, что атомы проходят либо сквозь одну прорезь, либо сквозь другую, как мы по праву и ожидаем, и точно не через две прорези одновременно, подобно рассеянной волне. Но не радуйтесь раньше времени и взгляните на экран. Детектор зарегистрировал сигнал атомов, которые прошли сквозь наблюдаемую прорезь, и поэтому вы уверены, что половина прошла сквозь одну прорезь, а половина – сквозь другую, однако картина интерференции при этом пропала! Вместо нее на экране видны всего два ярких световых пятна напротив каждой из прорезей. Теперь атомы повели себя, как частицы, прямо как песчинки. Такое впечатление, что атом ведет себя, как волна, при встрече с прорезями, однако если мы следим за ним, он невинно остается крошечной частицей. С ума сойти, правда?

² Здесь я предполагаю, что детектор на 100 процентов эффективен и точно сработает, если атом пройдет через наблюдаемую прорезь.



При добавлении детектора, который регистрирует, сквозь какую из щелей прошел атом, картина интерференции исчезает. Такое впечатление, что атомы не хотят, чтобы кто-то увидел, что они проходят одновременно сквозь обе прорези, и выбирают лишь одну из них. Две полосы, образующиеся на экране напротив прорезей, являются результатом поведения в духе частиц – такую же картину мы наблюдаем и при проведении опыта с песком.

Внизу: Детектор отключен, и мы не знаем, какой путь выбирает каждый из атомов. Теперь, когда ничто не угрожает раскрыть их тайну, атомы возвращаются к поведению в духе

волн, и мы снова видим картину интерференции!

Конечно, вы можете оказаться одним из тех, кого не так-то просто впечатлить, и даже сейчас решите, что в этом нет ничего особенно удивительного. Быть может, само присутствие большого детектора на пути атомов каким-то образом влияет на их странное и осторожное поведение. Но все же проблема, похоже, не в этом, потому что можно выключить детектор – и лишить себя возможности узнать, через какую из прорезей проходит атом, – и на втором экране снова проявится картина интерференции. Атом остается частицей на всем протяжении своего пути только тогда, когда за ним наблюдают. Очевидно, главное тут – сам факт наблюдения.

Словно бы этого недостаточно, фокус становится еще необычнее. Даже если признать, что атомы – хитрые негодники, может оказаться, что они все же недостаточно хитры! Давайте позволим атомам проходить сквозь прорези – конечно же по одному за раз – и делать все необходимое, для того чтобы на втором экране проявилась картина интерференции. Но теперь мы точно поймаем их с поличным. В так называемых экспериментах «с отложенным выбором» можно установить детектор на место и включить его только после того, как атом пройдет сквозь прорези. Мы сможем удостовериться в этом, контролируя энергию выпускаемых атомов и таким образом понимая, сколько времени нужно любому из атомов, чтобы достичь первого экрана.

Такой эксперимент действительно проводился с фотонами, а не с атомами, но суть остается прежней. Современная высокоскоростная электроника позволяет расположить детектор достаточно близко к одной из прорезей, чтобы он сумел определить, прошел ли сквозь нее атом, но включаться этот детектор должен только тогда, когда атом, ведущий себя, как рассеянная волна, пройдет сквозь обе прорези, но еще не достигнет детектора. Конечно же, в этот момент атому будет уже слишком поздно вдруг решить вести себя, как локализованная частица, которая прошла только сквозь одну из прорезей. Но не тут-то было! В таких экспериментах картина интерференции все равно исчезает.

Что происходит? Все это напоминает магию, и я подозреваю, что вы мне не верите. Что ж, физики много лет пытались вывести логичное объяснение наблюдаемого. Здесь мне, пожалуй, стоит уточнить, что именно я подразумеваю под «логичным объяснением». Я использую этот термин в простом, обыденном смысле, имея в виду объяснение, которое полностью вписывается в рамки того, что мы считаем рациональным, разумным и осмысленным, и в то же время не вступает в противоречие или в открытый конфликт с поведением других явлений, которые мы можем наблюдать непосредственно.

На самом деле квантовая механика дает нам полностью логичное объяснение фокуса с двумя прорезями. Но это объяснение относится только к тому, что мы наблюдаем, но не к тому, что происходит, когда мы не смотрим. Однако, раз уж нам приходится отталкиваться от того, что мы можем увидеть и измерить, нам, вероятно, нет смысла просить большего. Как нам осознать истинность или допустимость явления, которое нам в принципе никогда не удастся проверить? Любая наша попытка меняет результат.

Может, я слишком много прошу от слова «логичный». В конце концов, в нашей жизни огромное количество моментов, когда мы можем назвать поведение чего-либо нелогичным или иррациональным. Все это означает, что такое поведение оказалось в некотором роде неожиданным. В целом мы должны иметь возможность анализировать поведение на основании причинно-следственных связей: что одно происходит в результате другого и так далее. Неважно, насколько сложна цепочка событий, приведших к определенному поведению, и неважно, что мы не можем полностью осознать каждый шаг. Важно то, что наблюдаемое каким-то образом может быть объяснено. Могут работать новые процессы, новые свойства или качества природы, которые еще не поняты или даже не открыты. Важно только то, что для объяснения происходящего мы можем применять логику, какой бы витиеватой она ни была.

Физикам пришлось признать, что в случае с фокусом с двумя прорезями рационального

выхода не существует. Можно объяснить, что мы видим, но не почему. Какими бы странными вам ни казались предсказания квантовой механики, нужно подчеркнуть, что странная на самом деле не теория, разработанная человеком, а сама Природа, которая настаивает на столь странной реальности в микроскопическом масштабе.

Несколько лет назад я прочитал стихотворение Роберта Фроста «Другая дорога», которое американцы назвали своим самым популярным стихотворением на все времена. Фрост, который давно считается самым любимым поэтом Америки XX века, практически всю жизнь провел в Новой Англии и писал в основном о деревенской жизни сельского Нью-Гэмпшира. Несколько меланхоличная «Другая дорога» – прекрасный пример его творчества. Она также проникает – и в этом не было умысла Фроста – в самую суть того, каким должен быть квантовый мир:

В осеннем лесу, на развилке дорог,
Стоял я, задумавшись, у поворота;
Пути было два, и мир был широк,
Однако я раздвоиться не мог,
И надо было решаться на что-то.

Я выбрал дорогу, что вправо вела
И, повернув, пропадала в чащобе.
Нехоженей, что ли, она была
И больше, казалось мне, заросла;
А впрочем, заросшими были обе.

И обе манили, радуя глаз
Сухой желтизною листвы сыпучей.
Другую оставил я про запас,
Хотя и догадывался в тот час,
Что вряд ли вернуться выпадет случай.

Еще я вспомню когда-нибудь
Далекое это утро лесное:
Ведь был и другой предо мною путь,
Но я решил направо свернуть —
И это решило все остальное³.

Хотя мы часто тяготимся сожалениями по поводу своего выбора, квантовая механика утверждает, что на субатомном уровне все совсем иначе. Когда мы встречаемся с квантовым миром впервые, он кажется нам невероятным, потому что мы судим его на основании собственных предрассудков, вынесенных из обыденной жизни, то есть на основании того, что мы называем здравым смыслом. Но квантовые объекты, без сомнения, ведут себя чуждым образом. Один атом может пройти по обеим дорогам в осеннем лесу Фроста... Атомы не печалятся о своем выборе, потому что могут одновременно проверить все возможные варианты. Они явно следуют совету великого американского бейсболиста Йоги Берры, который сказал: «Если вы нашли на дороге вилку, поднимите ее».

3 Перевод Г. Кружкова. – *Примеч. пер.*



Квантовый лыжник. Чтобы подчеркнуть, насколько необычно поведение квантовых частиц, можно представить себе лыжника, которому необходимо обогнуть дерево, стоящее у него на пути, и который решил объехать его с обеих сторон сразу. В нашем обычном мире деревьев и лыжников это конечно же покажется просто шуткой. Но в квантовом мире это происходит на самом деле.

То, что мы увидели в этой главе, представляет собой лишь один пример проявления квантового феномена, называемого «суперпозицией». Я мог бы описать любой из множества одинаково удивительных «фокусов», основывающихся на квантовой суперпозиции, а также нескольких других поразительных чертах, уникальных для квантового мира. Надеюсь, эта глава не отпугнула вас, ведь впереди нас ждет увлекательное путешествие.

Фуллерены и эксперимент с двумя прорезями

Профессор Маркус Арндт и профессор Антон Цайлингер. Кафедра физики, Университет Вены

Мы обычно считаем физическое тело локализованным объектом, в то время как понятие волны тесно связано с чем-то более широким и нелокализованным. Вопреки распространенному мнению, квантовая физика утверждает, что оба этих, казалось бы, противоречащих друг другу понятия могут применяться к одному и тому же объекту в одном и том же эксперименте.

Недавно мы провели такой эксперимент с большими молекулами углерода, называемыми фуллеренами. Эти молекулы, известные как C₆₀ и C₇₀, содержат по шестьдесят или семьдесят атомов углерода, выстроенных таким образом, чтобы сформировать самую маленькую известную копию футбольного мяча диаметром не более

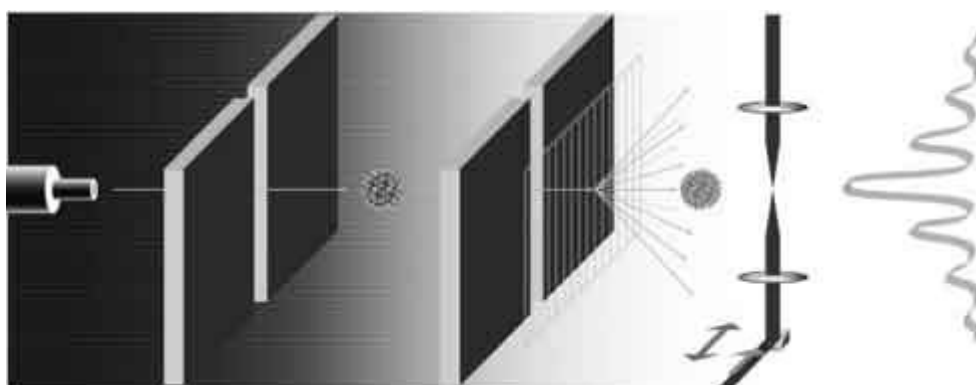
одной миллионной миллиметра. Несмотря на маленький размер, эти молекулы на сегодняшний день представляют собой самые крупные объекты, когда-либо использованные для демонстрации волнообразной природы материи.

Эксперимент заключается в следующем. Источником молекул становится простая термокамера, заполненная угольным порошком. Молекулы пробиваются наружу сквозь отверстие подобно тому, как пар выходит из горячего чайника. Затем они пролетают сквозь две коллимирующие прорези к лазерному детектору высокого разрешения, который можно настроить таким образом, чтобы он регистрировал пространственное распределение молекулярного пучка.

По пути к детектору молекулы могут столкнуться с тремя возможными вариантами: либо препятствий не будет вообще, либо прорезь окажется очень узкой, либо решетка – мембрана с несколькими прорезями – окажется очень мелкой.

Для первого – «пустого» – случая профиль молекулярного пучка будет представлять собой единственный узкий пик в полном соответствии с нашими наивными ожиданиями, которые заключаются в том, что каждую молекулу можно считать обычным мячом в свободном полете.

Однако во втором случае возникает первая странность: если поместить между источником и детектором одну очень узкую – 70 нанометров (70 миллионных миллиметра) шириной – прорезь, мы увидим на экране профиль, отличающийся от пустого случая. Вместо ожидаемого сужения, которое произошло бы, если бы молекулы действительно были просто маленькими футбольными мячами, мы заметим сильное расширение пика. Это расширение является следствием дифракции, свойственной волнам.



Ситуация становится еще более странной, когда мы заменяем узкую прорезь решеткой. Эта структура состоит из нескольких прорезей, каждая из которых чуть уже первой (по 50 нанометров). Эти прорези расположены на равном расстоянии друг от друга (между ними тоже около 50 нанометров). Если бы молекулы были простыми частицами, мы могли бы ожидать повышения интенсивности сигнала на всем экране. Но – вопреки нашему здравому смыслу – мы видим, что на экране появляются области, в которые молекулы не попадают вообще.

Открытие двух или более дополнительных отверстий в стене вместо одного снижает количество зарегистрированных в определенных местах молекул. Это очень нелогично и уже не может быть объяснено на модели мячей, которые летят по определенным путям, но находится в полном согласии с моделью, основанной на волновой природе единичных молекул. Тут мы отбрасываем идею «траектории» и позволяем молекулам одновременно исследовать более широкое пространство, которое на много порядков больше самой молекулы, в результате чего возникает квантовая интерференция.

Важно отметить, что щелчки детектора хорошо локализованы и что каждая молекула, насколько мы можем судить, ударяется в совершенно случайную область экрана. И все же по мере регистрации молекул детектором на экране постепенно вырисовывается странная волнообразная картина.

Глава 2. Истоки

Многие научно-популярные книги и даже учебники физики пропагандируют два мифа, связанных с происхождением квантовой механики. Само собой, часто о развитии науки говорят чересчур упрощенно, и это даже полезно для обучения. Научный прогресс в основном представляет собой запутанный и медленный процесс, и, только оглядываясь назад, когда теория или феномен уже полностью поняты, его историю можно рассказать в педагогическом, а не в хронологическом порядке. Для этого приходится отсеять некоторых личностей и некоторые события из общей массы, закрывая глаза на красивые истории многочисленных Нобелевских премий.

Так в чем заключаются два этих мифа?

Первый представляет собой упрощенное и неточное описание состояния физики в конце XIX века. Утверждается, что ученые того времени полагали, будто большая часть физики уже открыта и объяснена, а все физические явления можно понять, опираясь на представления о мире, покоящиеся на двух столпах – механике и законах Ньютона и недавно завершённой теории электромагнетизма Джеймса Максвелла. Оставалось только расставить точки над «i».

Второй миф гласит, что немецкий физик Макс Планк предложил революционно новую формулу для описания экспериментального результата в области термодинамики⁴, который невозможно было воссоздать при помощи господствующей теории, и квантовая революция не заставила себя ждать.

КАК ВСЕ НАЧАЛОСЬ

Хотя эта книга не задумывалась как история квантовой механики или личностей, связанных с ее развитием, в этой главе я все же расскажу, как и почему зародилась эта область науки. В связи с этим, хотя мне и не хочется слишком погружаться в описание физики до квантовой механики, весьма интересно определить, когда именно и как все началось. Что касается первого мифа, правда в том, что к концу XIX века накопилось столько неотвеченных вопросов и столько необъясненных явлений, что прорыв был неизбежен. Физики и химики не могли даже согласиться, состоит ли материя из неделимых атомов или она последовательно и бесконечно делима. Они также не могли решить, применима ли механика Ньютона (уравнения, описывающие взаимодействие и движение макроскопических объектов⁵ под влиянием сил) к более фундаментальной теории электромагнетизма Максвелла.

Как будто столь фундаментальных вопросов было недостаточно, ожесточенные споры шли по поводу относительно новых областей физики, таких как термодинамика и статистическая механика⁶. В экспериментальной сфере объяснения ждали фотоэлектрический эффект и излучение черного тела (я скоро опишу оба этих явления); кроме того, никто не понимал, как интерпретировать значение картины «линейчатого спектра» света, характерного для определенных элементов. В дополнение к этому весь мир

4 От thermo – «тепло» и dynamics – «движение». Эта область науки изучает, как тепло и другие формы энергии переносятся между телами.

5 По сути, макроскопическим можно назвать любой видимый нами объект, который достаточно велик, чтобы вести себя логичным «неквантовым» образом, в то время как микроскопическими называют объекты, размер которых достаточно мал (на уровне атомов и меньше), чтобы их поведение определялось квантовыми законами.

6 Наука о том, как вывести макроскопические свойства материи из микроскопической физики.

был взволнован только что открытыми таинственными феноменами рентгеновских лучей (1895 год) и радиоактивности (1896 год), не говоря уже об открытии электрона (1897 год). В общем, физика была в раздрае.

Второй миф заключается в том, что в конце 1900 года Макс Планк совершил революцию в науке, предположив, что энергия распространяется сгустками (под названием «кванты») – ему нужно было ввести это понятие, чтобы понять, как теплые объекты излучают свое тепло, – и тут же возникла квантовая теория. На самом деле все было гораздо сложнее. Некоторые историки науки и вовсе отрицают, что Планк заслуживает хоть какого-то признания за «открытие» квантовой теории⁷. В отличие от многих великих революционных открытий, квантовая механика не обязана своим появлением озарению единственного гения. Ньютон прозрел, когда на ферме его матери ему на голову упало яблоко, которое и подтолкнуло его к открытию знаменитого закона всемирного тяготения (хотя и есть вероятность, что это событие легендарно). Невозможно отрицать, что Дарвину принадлежит заслуга вывода теории эволюции, а Эйнштейн разработал теории относительности. Но открыть квантовую механику в одиночку было невозможно. Ее разработка заняла тридцать лет и потребовала совместных усилий величайших ученых со всего мира.

Прежде чем продолжить, мне следует объяснить, почему я использую то понятие «квантовая теория», то «квантовая механика». Первое обычно применяется для описания положения дел в период с 1900 по 1920 год, когда все находилось на уровне простых постулатов и формул, которые помогали прояснить кое-какие вопросы природы света и структуры атомов. Настоящая революция произошла только в 1920-х годах, когда при описании основополагающей структуры субатомного мира на смену «механике» Ньютона пришла совершенно новая теория – квантовая механика.

Но давайте вернемся к вопросу о том, как все началось, и дадим на него честный ответ. В 1918 году Планк получил Нобелевскую премию по физике с формулировкой: «В знак признания услуг, которые он оказал развитию физики своим открытием квантов энергии». Поэтому, хотя мы и увидим, что другие, включая Эйнштейна и Больцмана, тоже могут претендовать на лидирующую роль в строительстве фундамента оригинальной квантовой теории, ключом к ней все же является концепция «кванта», которая впервые появилась в простой формуле Планка. Так что же именно он сделал?

Планк вырос в Мюнхене, учился в Берлине и получил докторскую степень в возрасте всего лишь 21 года. Через десять лет он стал профессором физики. Но прошло еще целых одиннадцать лет, прежде чем на лекции в Берлинском физическом обществе он предложил свою знаменитую формулу, которую вывел для конкретной цели, заключавшейся в том, чтобы решить давнюю проблему, связанную с тем, как некоторые объекты излучают тепло. Однако он отнесся к своей формуле скорее как к удобному математическому трюку и не сразу заметил, что она содержит в себе глубокую правду об окружающем мире⁸.

Постоянная Планка

В соответствии с формулой Планка энергия мельчайшего сгустка света заданной частоты (один квант) равна частоте, умноженной на определенную постоянную. Эта постоянная называется постоянной действия Планка. Она обозначается буквой h и, как и скорость света c , является одной из универсальных постоянных природы.

Отношение энергии и частоты очень просто. Например, частота фиолетового света на

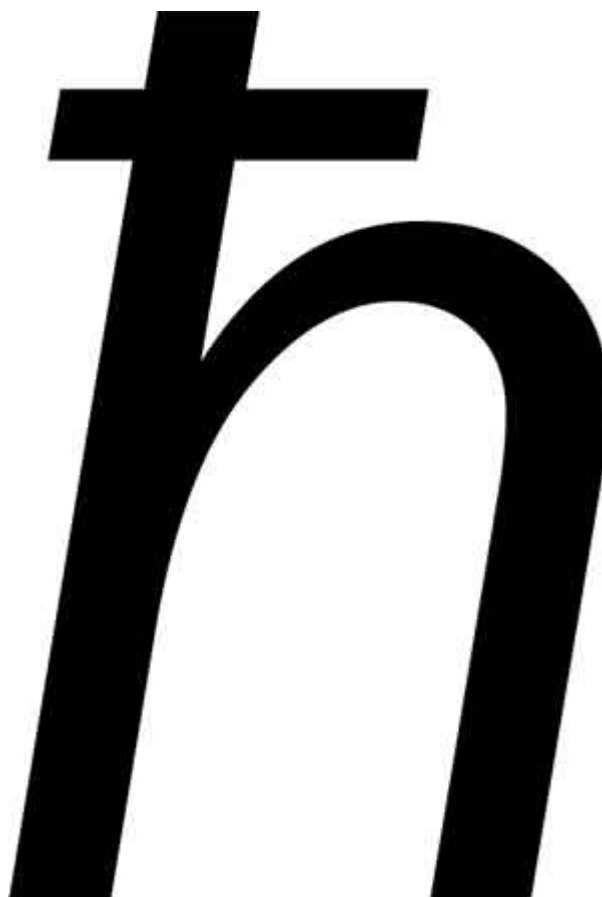
⁷ Это расхождение во мнениях отлично описывается в работе философа Томаса Куна *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity: 1894–1912* (Clarendon Press, Oxford, 1978) и в работе историка науки Хельге Крагха *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century* (Princeton University Press, 1999).

⁸ Впоследствии Планк счел крайне сложным принять предсказания квантовой теории и много лет пытался найти способ опровергнуть свои выводы.

одной стороне видимого диапазона вдвое больше частоты красного света на другой его стороне, так что квант фиолетового света обладает вдвое большей энергией, чем квант красного света.

Сегодня постоянная Планка знакома каждому студенту-физику. В единицах килограммов, метров и секунд ее значение чрезвычайно мало и составляет $6,63 \times 10^{-34}$, и все же это одно из самых важных чисел в науке. Каким бы ничтожным ни было это число, главное, что оно не равняется нулю, ведь иначе квантового поведения бы просто не существовало.

Очень часто постоянную Планка комбинируют с другой фундаментальной постоянной природы, числом пи (π). Это число, как говорят всем школьникам, представляет собой отношение длины окружности к ее диаметру и все время появляется в физических уравнениях. На самом деле число $h/2\pi$ так часто возникает в квантовой механике, что для него даже ввели специальный символ, который называется « \hbar с чертой».



Излучение черного тела

Тепло Солнца, или тепловое излучение, которое вы летом ощущаете у себя на лице, достигает нас, проникая сквозь вакуум космоса. Однако вы, возможно, не знаете, что на путешествие от Солнца до Земли это излучение тратит ровно столько же времени (около восьми минут), сколько нужно солнечному свету, чтобы достигнуть нашей планеты. Причина этого заключается в том, что и тепловое, и видимое излучения Солнца являются электромагнитными волнами. Друг от друга они отличаются лишь длиной волны. Колебания волн видимого света более сжаты (длина волны у него меньше, а частота – больше), чем колебания волн, которые мы ощущаем как тепло. Солнце также испускает ультрафиолетовый свет, длина волны которого еще короче и который находится вне видимого диапазона.

Но электромагнитное излучение свойственно не только Солнцу. Оно характерно для

всех тел, причем их излучение охватывает весь диапазон частот. Распределение частот зависит от температуры тела. Если твердое тело нагреть до достаточной температуры, оно начнет светиться, но по мере охлаждения его свечение будет сходиться на нет, поскольку доминировать будет излучение с большей длиной волны – за пределами видимого диапазона. Это не означает, что тело перестанет испускать видимый свет: на самом деле интенсивность света будет слишком слаба, чтобы мы сумели его разглядеть. Само собой, вся материя также поглощает и отражает излучение, которое попадает на нее. То, какие длины волн поглощаются, а какие отражаются, определяет цвета всего, что мы видим.

Во второй половине XIX века физикам было очень интересно, как именно определенный теплый объект, именуемый черным телом, испускает излучение. Такие тела называются черными, потому что они представляют собой идеальные поглотители излучения и не отражают ни свет, ни тепло. Конечно же, черное тело должно каким-то образом отдавать энергию, которую оно поглощает, ведь иначе его температура будет стремиться к бесконечности! Следовательно, оно излучает тепло со всеми возможными длинами волн. Длина волны самого мощного излучения, само собой, зависит от температуры черного тела.

Почти во всех учебниках физики можно найти график, на котором изображено несколько кривых (называемых спектрами), показывающих, как мощность излучения черного тела зависит от длины волны излучения⁹ при различных температурах. Все эти кривые начинаются с низкой мощности при очень коротких волнах, достигают максимума и снова падают при длинных волнах. Физиков вроде Макса Планка особенно интересовала точная форма этих кривых.

В науке часто случается, что появляются новые экспериментальные данные, которые необходимо объяснять теоретикам. Так было и со спектрами излучения черного тела. В 1896 году коллега Планка Вильгельм Вин вывел формулу, которая позволила ему построить кривую, прекрасно соотносящуюся с полученными им и в точности выверенными экспериментальными данными для коротких волн, однако не соответствующую результатам для длинных волн.

Примерно в то же время один из столпов физики XIX века, англичанин лорд Рэлей предложил другую формулу, имеющую более строгое теоретическое обоснование, чем уравнение Вина. Однако эта теория страдала от обратной проблемы: она прекрасно соответствовала данным для длинных волн, но совершенно не подходила для описания предельно коротких, находящихся вне видимого диапазона. Этот провал теории Рэрея был выражен в кривой, которая предсказывала, что тепловое излучение, испускаемое черным телом, возрастает по мощности по мере укорачивания волн и снижается до бесконечности в ультрафиолетовой области спектра. Эта проблема получила название «ультрафиолетовой катастрофы».

Вопреки многим популярным мнениям, Макс Планк заинтересовался излучением черного тела не из-за провала формулы Рэрея¹⁰, а с целью поставить формулу Вина на твердый теоретический фундамент. Первые его попытки ни к чему не привели, и за ними последовал период очень напряженной работы, после которого он предварительно и довольно неохотно вывел новую, достаточно сильно отличающуюся от исходной формулу.

Будучи закоренелым консерватором, на ранних этапах своей карьеры Планк даже не верил в существование атомов, о которых говорили многие его современники, включая Людвигу Больцмана. Планк полагал, что не за горами тот день, когда докажут, что материя непрерывна – то есть состоит не из фундаментальных «кирпичиков», а может быть бесконечно делима и все равно сохранять свою сущность. Однако в поисках решения

⁹ Иногда показывается, как мощность зависит от частоты, а не от длины волны. Однако, поскольку эти свойства волн эквивалентны (короткие длины волн соответствуют высокой частоте, а длинные – низкой), оба типа графиков дают нам одинаковую информацию.

¹⁰ Термин «ультрафиолетовая катастрофа» даже не использовался до 1911 года.

проблемы излучения черного тела он основывал свою теорию именно на идеях Больцмана. Он представил свои результаты на семинаре Немецкого физического общества 14 декабря 1900 года, и эту дату часто считают днем рождения квантовой физики.

Его предположение было таково: если черное тело состоит из колеблющихся атомов – хотя стоит подчеркнуть, что Планк называл их просто «осцилляторами» (некими элементарными сущностями, которые осциллируют, или колеблются, на частоте, определяемой температурой тела), – то энергия, которую они испускают (излучение черного тела), зависит от частоты их колебаний. В таком случае чем выше их частота, тем больше энергии они могут испустить. Но важно то, что такие осцилляторы могут иметь лишь определенные режимы колебаний, а их частота повышается поэтапно, вместо того чтобы расти постепенно¹¹. Следовательно, отдаваемая энергия может принимать только определенные значения, так как не все из них допустимы. Иными словами, энергия будет распространяться отдельными сгустками, или «квантами». Это было радикальным отступлением от теории электромагнетизма Максвелла, в рамках которой энергия считалась непрерывной.

Здесь необходимо сделать две ремарки. Во-первых, Планк не сразу понял следствия своей революционной идеи. По его собственным словам, введение понятия кванта энергии было «исключительно формальным допущением, и [он] даже не думал об этом, полагая лишь, что должен любым способом добиться положительного результата». Во-вторых, Планк не считал, что вся энергия состоит из неделимых крошечных сгустков. Для этого открытия потребовались еще пять лет и гений Эйнштейна.

Итак, гипотеза Планка была основана на двух допущениях. Первое заключалось в том, что энергия атомов (или осцилляторов) может принимать лишь определенные значения – простые множители частоты колебаний атомов. Второе гласило, что излучение черного тела связано с переходом атомов с одного значения энергии на другое – или с одного энергетического уровня на другой. Когда энергия становится меньше, атом испускает один квант энергии излучения.

Проще всего представить это в форме мяча, который скачет по лестнице и в связи с этим отдает свою «потенциальную» энергию прыжками, а не постепенно, как происходит, когда он катится по гладкому склону. Разница заключается в том, что квантовые скачки между атомными энергетическими уровнями происходят мгновенно, в то время как потенциальная энергия мяча проходит по всем энергетическим уровням, так как мячу нужно небольшое, но конечное время, чтобы преодолеть все ступеньки друг за другом.

Важность работы Планка поняли не сразу. Вот как сказал об этом историк Хельге Крагх:

«Если в декабре 1900 года в физике и произошла революция, ее как будто никто не заметил. Не составил исключения и сам Планк, поэтому важность его работе во многом была предана исторической реконструкцией».

Эта оценка может показаться слишком резкой, но она, вероятно, и правильна. Впрочем, я буду более терпим и сформулирую все это немного иначе. Планк действительно стал отцом-основателем кванта, просто сам он этого в то время не знал! По достоинству оценить начатое им смогли только другие ученые, которые мыслили глубже и оригинальнее его. Как

¹¹ Это несколько напоминает разницу между игрой на гитаре и на скрипке. На грифе гитары есть «лады» – металлические порожки. Когда струну пальцем прижимают к порожку, находящемуся ниже требуемого лада, звучащая нота становится результатом вибрации струны на отрезке от этого лада до нижнего порожка. По очереди зажимая идущие друг за другом лады, мы изменяем длину вибрирующей струны, в результате чего высота звучания изменяется на полтона. В связи с этим гитара, как и фортепиано, не может издавать звук, высота которого находится между двух полутонов (если играющий на ней не применяет специальных навыков). В то же время на скрипке ладов нет, так что ее струны могут издавать звук любой частоты, или тона, в зависимости от того, куда именно поставить палец.

бы то ни было, вклад Планка остается лишь маленьким первым шагом в новую область. Каждый из таких физиков, как Эйнштейн, Бор, де Бройль, Шрёдингер и Гейзенберг, внес в нее гораздо больший вклад, чем сам Планк. Просто Планк стал первым.

Мне всегда был симпатичен Макс Планк, которому выпала нелегкая жизнь. В 1930-е, будучи уже умудренным опытом заслуженным ученым, он противостоял нацистам, но во время Второй мировой войны он столкнулся с великой личной трагедией. Он решил остаться в Германии при нацистском режиме, хотя открыто выступал против многих их идей, в частности против преследования евреев. Трое его детей скончались в юном возрасте, а еще двое сыновей не пережили войну. Один из них был убит в бою, а другой казнен за участие в провальной попытке убить Гитлера. Самому Планку тоже пришлось нелегко, когда в 1944 году бомбы союзников разрушили его дом. Он умер в 1947 году в возрасте 89 лет.

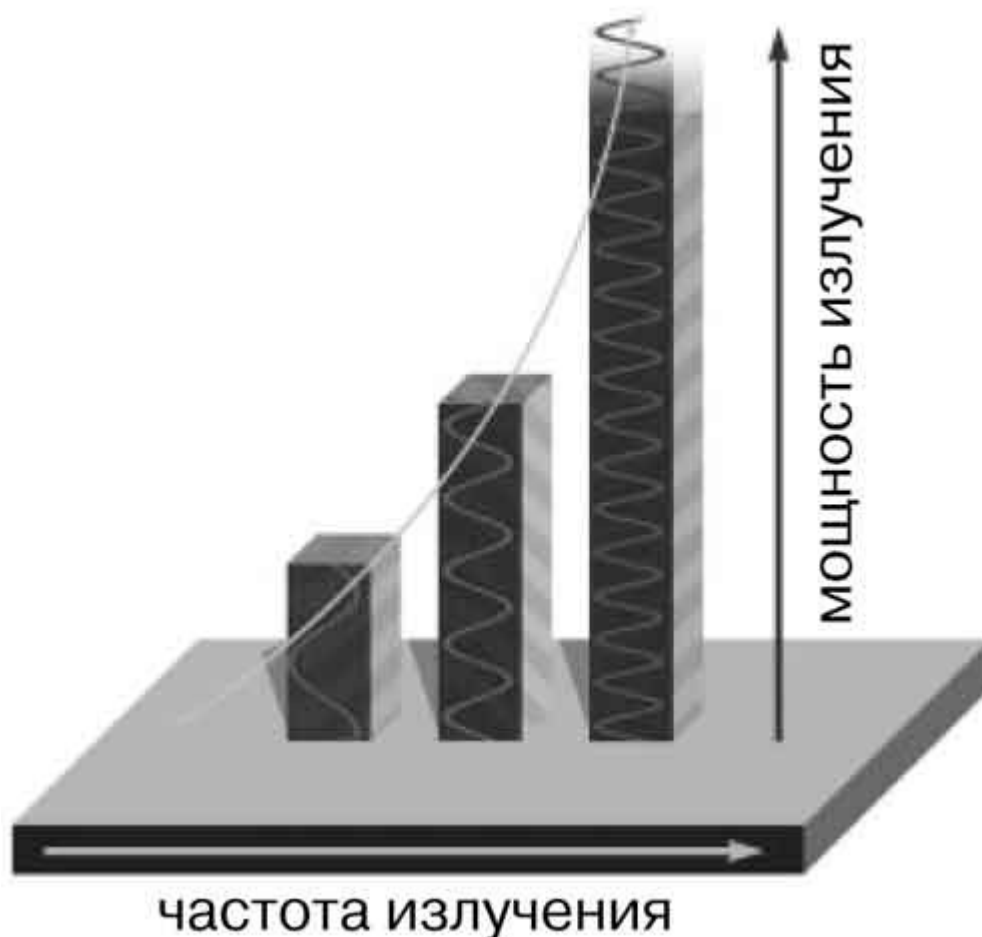
Эйнштейн

Даже если бы Эйнштейн не открыл теорию относительности, его имя все равно было бы известно каждому, отчасти благодаря той роли, которую он сыграл в развитии квантовой теории. Однако, раз уж он стоит на голову выше любого другого физика (за исключением Исаака Ньютона), по отношению к остальным кажется нечестным, что его считают ответственным за обе великие революции в науке XX века (открытие теории относительности и квантовой теории).

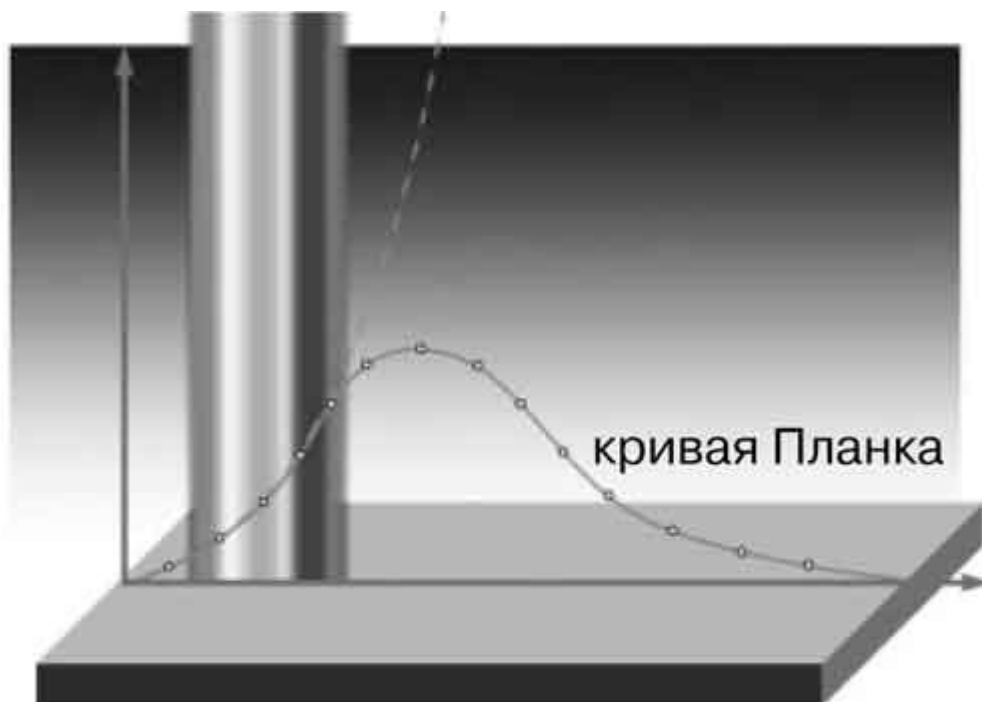
В 1905 году, когда Эйнштейну было всего 26 лет и он работал в Швейцарском патентном бюро, он опубликовал в физических журналах целых пять теоретических работ. Три из них были настолько важны, что любая в одиночку могла бы обеспечить ему место в истории.

Самой знаменитой – и самой важной – стала последняя из пяти. Это была статья о специальной теории относительности, в которой Эйнштейн показал, что еще один фундаментальный принцип ньютоновской физики, положение об абсолютности пространства и времени, на самом деле является лишь иллюзией. Он оттолкнулся от двух простых постулатов. Первый заключался в том, что законы природы не изменяются вне зависимости от того, насколько быстро мы двигаемся, так что никто не может утверждать, что находится в состоянии полного покоя, а все движение относительно. Второй гласил, что скорость света в пустом пространстве представляет собой фундаментальную константу природы, значение которой не меняется, на какой бы скорости ни двигался наблюдатель. Две этих идеи приводят нас к выводу, что и пространство, и время являются аспектами большого четырехмерного пространства-времени. Эйнштейн также доказал, что скорость света – это максимально возможная во Вселенной скорость. Специальная теория относительности вынуждает нас принять странные идеи – например, о том, что время замедляется, когда мы двигаемся очень быстро. Она также приводит нас к самому знаменитому уравнению Эйнштейна, связывающему массу и энергию: $E=mc^2$.

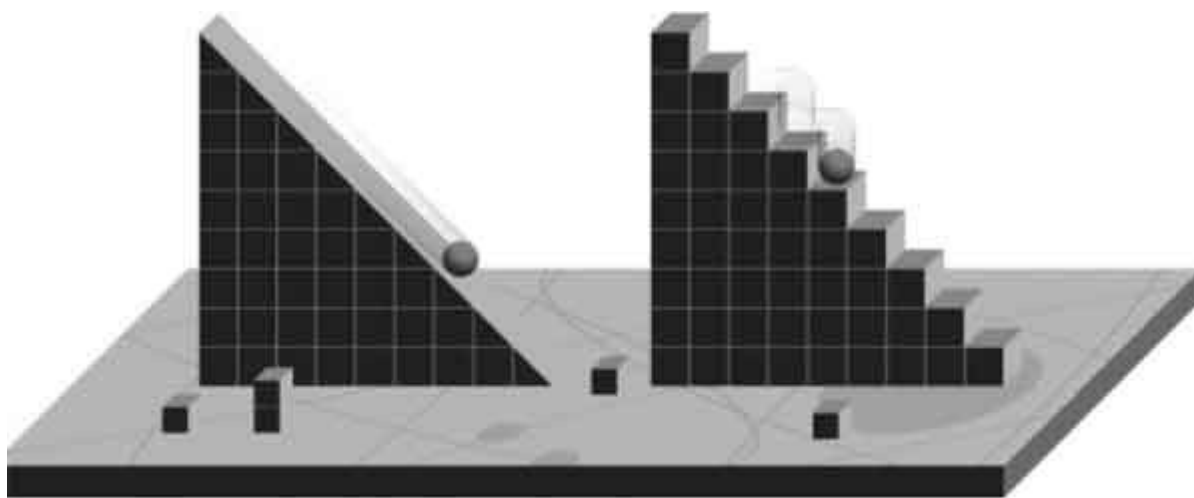
До этой статьи Эйнштейн опубликовал другую, в которой представил подробные расчеты описания броуновского движения. Этот феномен в 1827 году впервые наблюдал шотландский ботаник Роберт Броун, который под микроскопом изучил помещенные в воду частицы пыльцы и заметил, что они двигаются беспорядочно. Эйнштейн математически доказал, что это происходит из-за постоянного и произвольного движения молекул воды. Это и стало первым настоящим доказательством существования атомов. Сторонники идеи о том, что материя состоит из крошечных неделимых частиц, прекрасно понимали, что броуновское движение может объясняться движением атомов, но именно Эйнштейну удалось это подтвердить. Основанные на его работе эксперименты убедили последних сомневающихся в существовании атомов.



Старая волновая теория света гласила, что чем выше частота излучения черного тела, тем больше его мощность. На ультрафиолетовых частотах эта мощность становилась бесконечной. С теорией явно что-то было не так.



Квантовая теория Планка предсказала кривую, которая совпадала с кривой старой волновой теории на частотах в пределах видимого диапазона, но по мере увеличения частоты не продолжала подниматься вверх. Вместо этого теория предсказывала, что мощность должна снова снижаться до нуля – в полном соответствии с экспериментальными данными.



До Планка считалось, что испускаемая черным телом энергия непрерывна и может принимать любое значение – как мяч, катящийся по гладкому склону. Планк предположил, что энергия состоит из квантов, а потому может принимать только определенные значения.

Однако в первой из трех главных работ Эйнштейна, опубликованных в 1905 году, он объяснил происхождение феномена, известного как «фотоэлектрический эффект», и именно эта работа наиболее интересна для нашей истории. Пять лет на формулу Планка почти не обращали внимания. Эйнштейн подарил ей вторую жизнь и вывел ее следствия на новый уровень.

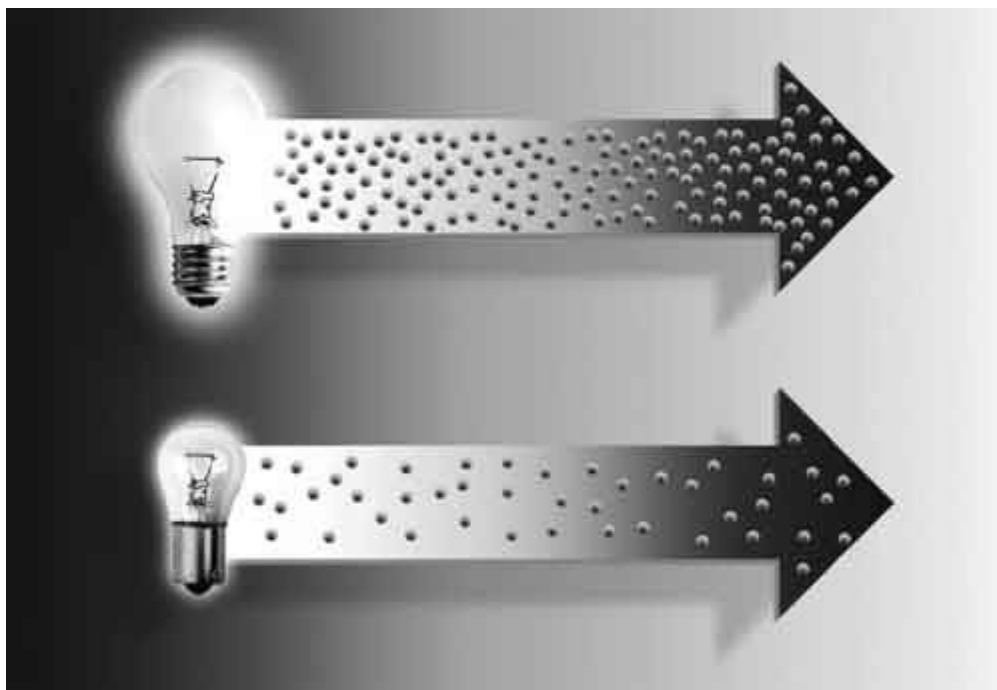
Частицы света

Фотоэлектрический эффект представлял собой еще один феномен, который не могла объяснить физика XIX века. Он заключался в том, что при направлении света на электрически заряженную металлическую пластину с ее поверхности начинали вылетать электроны. Внимательно изучив этот процесс, ученые пришли к выводу, что он еще сильнее противоречит господствующей волновой теории света, чем проблема излучения черного тела.

Этот эффект обладает тремя необычными характеристиками. Во-первых, можно решить, что раз уж свет способен выбивать частицы материи, то их энергия будет зависеть от яркости, или интенсивности, света. Как ни странно, было обнаружено, что на самом деле способность света выбивать электроны зависит от длины его волны. Если считать свет волной, этот результат становится довольно неожиданным, поскольку повышение его интенсивности, а следовательно, и энергии, предполагает и увеличение размеров его осцилляторов. Представьте волны, которые бьются о берег: энергии в них тем больше, чем они выше, а не чем быстрее они накатывают на землю. В фотоэлектрическом эффекте свет высокой интенсивности не выбивает более энергетически заряженные электроны, он просто выбивает больше электронов!

Во-вторых, согласно волновой теории, фотоэлектрический эффект должен наблюдаться при любой частоте света, при условии что он достаточно интенсивен, чтобы наделить электроны достаточным количеством энергии для отрыва. Однако при наблюдении выяснилось, что существует минимальная частота света, ниже которой электроны не испускаются, какой бы высокой ни была его интенсивность.

Наконец, волновая теория предполагает, что, находясь под действием энергии световой волны, электроны будут нуждаться в конечном времени для поглощения достаточного количества энергии, чтобы оторваться от поверхности, особенно если свет слаб. Но временной задержки не наблюдалось. Электроны выбивались, как только свет попадал на поверхность.



Яркий, более интенсивный свет является результатом большего количества фотонов, чем тусклый свет. Но средняя энергия отдельного фотона в обоих случаях одинакова.

Эйнштейн успешно объяснил этот эффект, применив идею Планка к сгусткам энергии света. Не забывайте, Планк не дошел до того, чтобы сказать, что все излучение делится на кванты. Вместо этого он предположил, что черное тело излучает энергию пакетами, поскольку это обусловлено свойствами материи. При этом он полагал, что в общем случае электромагнитическое излучение непрерывно. Эйнштейн предположил, что весь свет состоит из квантов энергии¹², которые теперь называют фотонами. Принять такое Планк был не готов.

Двойственная природа света

Вклад Планка и Эйнштейна в квантовую революцию стал лишь первым шагом на пути к ней. Оглядываясь сегодня назад и учитывая все, что мы знаем о богатстве квантовой механики и феноменах, которые она может объяснить, мы видим, что в идее о частицах света нет ничего удивительного. В конце концов, даже сам Исаак Ньютон полагал, что свет состоит из частиц, которые он называл «корпускулами». Современник Ньютона, голландский астроном Христиан Гюйгенс, разработал конкурирующую волновую теорию света. Но только в начале XIX века англичанин по имени Томас Юнг смог доказать, что свет совершенно точно представляет собой волну.

Юнг провел эксперимент с двумя прорезями¹³ со светом – этот эксперимент даже иногда называют экспериментом Юнга с прорезями, – а как мы увидели в первой главе, в его результатах нет ничего загадочного, если нам позволено думать, что волны проникают одновременно сквозь обе прорези. Мы понимаем, как волны делают это, и в результате на втором экране возникает картина интерференции. Нечего и удивляться, что после наблюдений Юнга ученые на сотню лет и думать забыли о том, что свет может состоять из частиц. В течение XIX века физики отдавали Ньютону должное за его великие достижения –

¹² Представьте их сгустками энергии, локализованными в пространстве. Однако, для того чтобы идея о «частицах» света прижилась, понадобилось некоторое время.

¹³ Само собой, в первой главе я называл его «фокусом», только чтобы добавить драматизма.

его до сих пор по праву считают одним из величайших физиков всех времен, – однако о его идее корпускул света всегда забывали. Если бы свет действительно состоял из частиц, на экране не могла бы проявляться картина интерференции.

Но затем, спустя сто лет после экспериментов Юнга, Эйнштейн доказал, что ради объяснения фотоэлектрического эффекта свет следует считать потоком частиц!

Так что же происходит? Такое впечатление, что мы не можем считать свет исключительно волновым феноменом, но не можем и сказать, что он состоит только из частиц. В одних обстоятельствах (прорези Юнга) он словно бы ведет себя, как волна, в то время как в других (фотоэлектрический эффект) – как набор локализованных частиц. Все рассмотренные нами на настоящий момент явления подсказывают, что эту двойственную природу света следует воспринимать серьезно, хотя нам и становится не по себе, когда мы сталкиваемся с ней впервые. И правда, сегодня так называемый корпускулярно-волновой дуализм уже ни у кого не вызывает сомнений.

Но подождите, разве не может существовать два типа света – волновой и корпускулярный? Может ли свет изменять свое состояние в зависимости от того, как мы его используем или наблюдаем? Концепция фотона кажется физикам достаточно сложной. Не забывайте, каждый отдельный фотон (частица) ассоциируется с конкретной частотой и длиной волны (свойствами волн). Так что же мы имеем в виду, говоря, что частица обладает длиной волны? Распространенные волны действительно обладают длинами, а частицы – хм, частицы не распространяются вообще!

Нобелевская премия Эйнштейна

В 1921 году Альберту Эйнштейну вручили Нобелевскую премию за объяснение фотоэлектрического эффекта, что в то время считалось гораздо более значительным открытием, чем его знаменитая работа над теорией относительности.

Согласно Эйнштейну, каждый электрон испускается с поверхности вещества, когда его выбивает один фотон света, энергия которого зависит от его частоты. Эйнштейн утверждал, что обычно мы не видим, что свет состоит из частиц, поскольку фотонов очень много: точно так же мы не видим отдельные капли чернил на напечатанном изображении. Давайте рассмотрим, как эта картина справляется с тремя загадочными характеристиками фотоэлектрического эффекта.

С первой все просто. Зависимость энергии испускаемого электрона от частоты света, а не от его интенсивности является прямым следствием уравнения Планка, которое связывает энергию света с его частотой.

Вторая характеристика возникает потому, что порог для испускания электронов появляется только тогда, когда энергии фотона достаточно, чтобы освободить электрон. При повышении интенсивности света количество фотонов возрастает. Отдельные фотоны так малы и локализованы в пространстве, что вероятность того, что любой одиночный электрон может аккумулировать достаточно энергии, чтобы вылететь после столкновения с более чем одним фотоном, крайне мала.

Наконец, процесс происходит мгновенно, поскольку электронам не приходится накапливать энергию из волны, рассеянной в пространстве. Вместо этого каждый фотон передает свою энергию электрону посредством одного столкновения. Если эта энергия больше необходимого порога, электрон будет испущен.



Фотоэлектрический эффект представляет собой испускание электронов с поверхности металла под воздействием света. Однако представление о свете как о волне не объясняет результатов наблюдений. Объяснить их можно, только допустив, что свет состоит из отдельных частиц (фотонов).

Бор: физик, философ, футболист

Следующий шаг в квантовой революции был сделан молодым датским физиком по имени Нильс Бор, который в 1911 году приехал в Англию, только что получив докторскую степень и прихватив с собой полное собрание сочинений Чарльза Диккенса (по которому он изучал английский язык). Само собой, Бор еще не был известным физиком, но считал научную карьеру более надежной, чем футбольную, хотя на любительском уровне он преуспел и в спорте. Однако до уровня своего младшего брата Гарольда, который играл в защите за датскую команду на Олимпиаде 1908 года и проиграл матч за золото Великобритании, он не дотягивал. Гарольд впоследствии стал очень уважаемым математиком.

Жизни Нильса Бора и автора этой книги пересеклись всего на два месяца, так что мне, к сожалению, не довелось повстречаться с ним. А если бы мне все же довелось с ним познакомиться, наша беседа вряд ли вышла бы особенно продуктивной. Но я много лет сотрудничал с человеком, который знал его очень хорошо. Физик-теоретик Йенс Банг был последним научным ассистентом Бора, а потому он может многое рассказать об этом великом человеке и глубоко понимает его философские воззрения. Да, Бор-философ был едва ли не менее знаменит, чем Бор-ученый.

Он начал свое квантовое путешествие, когда в 1912 году устроился в Манчестере на работу к выходцу из Новой Зеландии Эрнесту Резерфорду. В то время Резерфорд был одним из ведущих ученых и в 1908 году получил Нобелевскую премию по химии, хотя и занимался физикой. Бор появился у него в лаборатории примерно тогда, когда Резерфорд разработал свою модель атома. Он только что выяснил, что атомы состоят из крошечного плотного ядра, которое окружено еще более крошечными электронами.

Бор попытался понять структуру модели атома Резерфорда и тем самым начал полувекую работу по объяснению сути квантовых феноменов. Именно его сегодня по праву и считают истинным отцом-основателем квантовой механики. Может, Планк и Эйнштейн и сделали первые шаги в эту область, но вклад Бора оказался гораздо существеннее.

Первый успех пришел к нему, когда он решил две проблемы, связанные со структурой атомов: установил происхождение линейчатого спектра и нашел объяснение стабильности атома.

Модель атома Резерфорда предполагала, что электроны находятся за пределами ядра на расстоянии, в тысячи раз превышающем радиус этого ядра. Такая картина сразу же ставила вопрос о стабильности атома. Прежде всего, физики были уверены, что электроны не могут находиться в покое внутри атомов, так как электрическая сила, исходящая положительно заряженным ядром, должна притягивать электроны внутрь. Так что проще всего было представить себе планетарную модель, в которой электроны постоянно вращались вокруг ядра, как Земля вращается вокруг Солнца, чтобы ее не притянуло к нему под действием гравитационных сил.

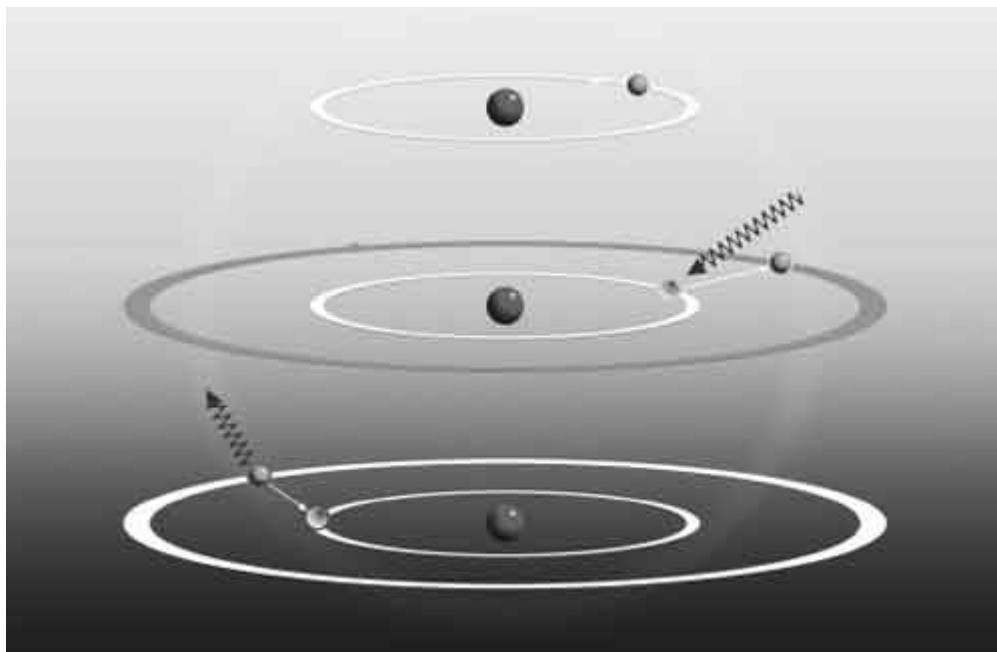
Однако Бора озадачило одно важное отличие атома от Солнечной системы (не считая их размеров, конечно). В соответствии с классической теорией электромагнетизма, вращающийся вокруг ядра электрон должен излучать свет. Следовательно, по мере потери энергии он будет по спирали приближаться к ядру. Этот процесс будет происходить очень быстро – примерно за одну тысячемиллионную долю секунды – и атомы будут схлопываться.

В ретроспективе идея Бора кажется очевидной, но в то время она произвела настоящий переворот. Он предположил, что если материя испускает излучение сгустками (как в случае с

черными телами) и поглощает его тоже сгустками (фотоэлектрический эффект), то атомы, из которых состоит материя, возможно, просто не способны обладать энергией, значение которой равняется нецелому числу этих сгустков.

С этой идеей Бор зашел дальше Планка, который полагал, что квантование излучения происходит исключительно из-за колебаний атомов в теплых черных телах и не является чертой, характерной для всех атомов вследствие их внутренней структуры.

Бор допустил, что энергия электронов в атомах тоже состоит из квантов. В таком случае электроны не могут выбирать любую орбиту, как было бы возможно в соответствии с законами движения Ньютона, а вынуждены следовать по определенным «отдельным» орбитам, подобным концентрическим кругам. Электрон может перескочить на более низкую орбиту, только испустив квант электромагнитной энергии (фотон). Точно так же перепрыгнуть на более высокую орбиту он может, только поглотив фотон. Впоследствии стабильность атомов более подробно изучил молодой немецкий гений Вольфганг Паули, который доказал, что каждая электронная орбита может вместить только определенное количество электронов. В связи с этим электроны могут перепрыгивать на более низкую орбиту, только если там для них есть место. Позже мы увидим, что электроны нельзя считать крошечными частицами, вращающимися вокруг ядра, поскольку каждый из них является распространенной волной, а каждая из этих «электронных волн» замыкается в кольцо вокруг ядра.



Предложенная Бором модель атома водорода состояла из электрона на фиксированной орбите вокруг атомного ядра. Если электрон поглощал фотон верной частоты (средняя диаграмма), он получал достаточное количество энергии, чтобы «перепрыгнуть» на более высокую (более отдаленную от ядра) орбиту. В таком случае атом оказывался в возбужденном состоянии. Эта ситуация в целом нестабильна, поэтому вскоре атом терял свое возбуждение (нижняя диаграмма). Электрон испускал фотон с такой же точно энергией, что и первый, благодаря этому сам терял энергию и падал обратно в свое «основное состояние».

Бор также сумел объяснить значение атомных спектров – того факта, что элементы отдают свет на точно определенном наборе частот (называемых спектральными линиями), причем каждый спектр уникален для конкретного элемента. Характерные частоты, на которых каждый конкретный тип атома испускает свет, соответствуют определенным энергиям (по уравнению Планка). Энергии испущенных фотонов соответствуют энергии, потерянной электронами атома при опускании на более низкие орбиты.

Следует подчеркнуть, что, хотя Бор и применил идею квантования Планка к атомной

структуре, объяснить, как именно электроны перепрыгивают с орбиты на орбиту, он не смог. Прямо как несчастный Планк, Бор представил свою формулу для решения конкретной задачи. Несмотря на мнение многих физиков-теоретиков, он не вывел ее на основании глубоких фундаментальных принципов. Хотя его атомная модель миниатюрной Солнечной системы работала как будто очень хорошо, в ней все еще учитывались аспекты ньютоновской физики, которые оказались неверными. Хуже всего, его модель фактически работала только для водорода, атом которого содержит лишь один электрон! Более сложные конструкции в модель не вписывались. Более полное понимание структуры атома требовало серьезного развития квантовой механики, которое произошло лишь десять лет спустя.

Сегодня физики не зря возмущаются, что детям в школах до сих пор показывают разработанную Бором модель атома. Атомы выглядят совсем не так¹⁴. Предложенная Бором модель атома водорода поставила точку в первой фазе квантовой революции, которую сегодня называют квантовой теорией.

В дело вступает французский герцог

Давайте теперь обратимся к началу 1920-х годов и молодому французскому герцогу Луи де Бройлю, который в то время как раз работал над своей докторской. Ладно, на самом деле он не был герцогом (по принципу старшинства), но все же был аристократом из благородной семьи, и его предки служили французским королям еще со времен знаменитого Людовика XIV.

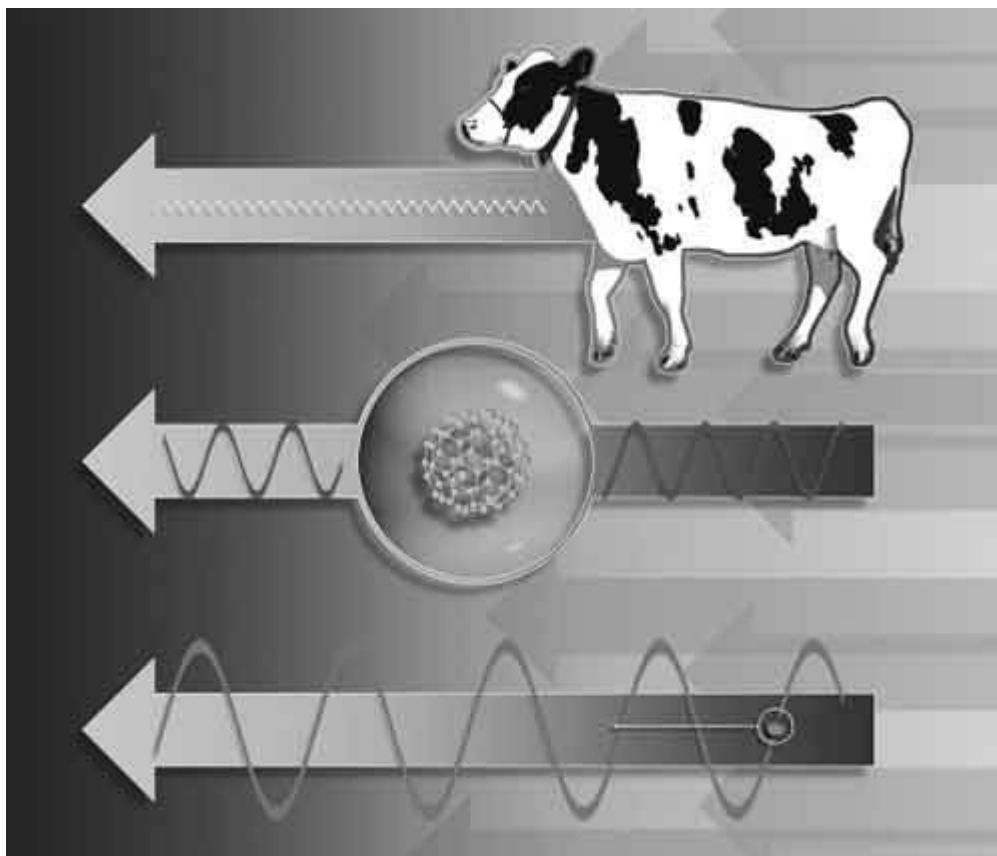
В 1924 году де Бройль представил свою диссертацию, в которой сделал смелое предположение: если свет, который нам проще считать волной, может, согласно Планку и Эйнштейну, иногда вести себя, как поток частиц, то было бы довольно красиво, если бы движущиеся частицы тоже иногда могли вести себя, как волны.

Может, сначала это утверждение и кажется странным, но подумайте о нем следующим образом. К 1920-м физики уже вполне освоились с идеей Эйнштейна о том, что материя и энергия взаимозаменяемы согласно его формуле $E=mc^2$. Это предполагает, что материю можно считать некой замершей энергией, а материю и энергию можно превращать друг в друга. Следовательно, раз уж свет, а точнее электромагнитное излучение, которое представляет собой одну из форм энергии, может иметь двойственную природу, то почему подобным образом не может вести себя и материя?

Де Бройль предположил, что каждый материальный объект можно ассоциировать с «волной материи», длина которой зависит от массы объекта. Чем более тяжела частица, тем короче длина связанной с ней волны. Обратите внимание, что я использовал здесь слово «связанной», поскольку де Бройль все еще считал материальные объекты твердыми «сгустками», к которым каким-то образом добавляются волны. Однако в случае со светом мы видели, что «материал» всегда одинаков, вот только ведет он себя то как волна, то как частица.

Де Бройля вдохновила работа американского физика Артура Комптона, который привел новое неопровержимое доказательство корпускулярной природы света. В 1923 году, за год до завершения диссертации де Бройля, Комптон провел эксперимент, который подтвердил существование фотонов. Он направил рентгеновские лучи (которые по сути являются высокочастотным светом) на блок графита и обнаружил, что частота отраженных лучей становится немного ниже изначальной. Это шло вразрез с предсказанием старой волновой теории, которая гласила, что частота света должна оставаться неизменной. Но если рентгеновские лучи представляли собой поток высокоэнергетических фотонов, сталкивающихся с отдельными электронами графита, то часть их энергии должна была теряться, а это, согласно формуле Планка, вело к понижению частоты.

¹⁴ Вам придется подождать до седьмой главы, чтобы увидеть лучшее описание атомов. Впрочем, дальше мы узнаем, что «выглядят» атомы не так.



Градации волн материи де Бройля, связанных с разными объектами.

Вверху: Длина волны де Бройля для коровы будет в несколько триллионов раз меньше атомных измерений – столь короткую волну невозможно будет даже обнаружить. Ее размеры будут находиться в таком масштабе, где значение теряет сама идея пространства. Так что нам не стоит беспокоиться о волновых коровах.

В середине: Длина волны де Бройля для молекулы C₆₀ (фуллерена), движущейся на скорости несколько метров в секунду, примерно равна размеру самой молекулы (около одного нанометра). Внизу: Длина волны де Бройля для электрона, движущегося на скорости несколько метров в секунду, равна толщине человеческого волоса (доля миллиметра). Это значение достаточно велико, чтобы его квантовая волновая природа с легкостью проявляла себя в экспериментах и даже в повседневной жизни.

Не заметить здесь очевидную симметрию де Бройль не смог. Почему фотоны могут обладать одновременно волновыми и корпускулярными свойствами, а электроны не могут? В конце концов, комптоновское рассеяние, как этот процесс называют сегодня, предлагало картину сталкивающихся твердых частиц. Так если фотон можно поставить на одну доску с электроном, может быть, верно и обратное? Экспериментальное подтверждение волновой природы электронов появилось лишь в 1927 году, когда было впервые продемонстрировано, что пучки электронов также дают картину интерференции, – и это стало первым успешным подтверждением фокуса с двумя прорезями в отношении частиц материи.

Но как именно рассуждал де Бройль? Волновая природа материи всегда несколько сбивает с толку. Сам де Бройль не выдвинул предположения, что электрон представляет собой распространенную волну (хотя это предположение вскоре было выдвинуто другими учеными), а сказал, что он является твердой локализованной частицей, переносимой так называемым волновым пакетом. Это изолированный участок волны, подобный пульсу, который можно создать путем наложения многих волн с разной амплитудой и длиной волны таким образом, чтобы они интерферировали и нейтрализовали друг друга везде, кроме крошечной локализованной области, где находится частица.

Де Бройль вывел формулу, которая связала импульс частицы, будь это фотон или электрон, с длиной связанной с ней волны: чем больше импульс, тем короче длина волны. Потому мы и не можем засечь волновое поведение окружающих нас объектов – людей, футбольных мячей, песчинок. Эти объекты на много порядков тяжелее электронов, а длина их волн на много порядков короче, чем длины на субатомном уровне, поэтому ее невозможно обнаружить. Но можно ли измерить волны материи, связанные с электронами и даже целыми атомами? Более того, если они действительно существуют, может, это и объясняет фокус с двумя прорезями? Может, именно связанная с атомом волна проходит сквозь обе прорези одновременно, в то время как сам атом проходит лишь через одну из них?

В то время революционное предложение Луи де Бройля показалось его коллегам-физикам слишком радикальным. Возникли даже сомнения, присуждать ли ему докторскую степень, но в последний момент в научный спор вмешался сам Эйнштейн, который ознакомился с работой де Бройля и убедил экзаменаторов в справедливости его выводов.

Вскоре после того как изыскания де Бройля получили известность, все начало происходить очень быстро. Физики по всей Европе принялись сводить воедино фрагменты нового математического аппарата и спорить о получаемых результатах. На место становились не только кусочки математической мозаики – ученые одновременно и независимо друг от друга совершали открытия, связь между которыми удалось установить лишь значительно позже.

В связи с этим я закончу эту историческую главу и перейду к описанию того, что квантовая механика сообщает нам о поведении природы, вместо того чтобы рассказывать, как физики пришли к тому или иному выводу. Квантовую механику можно объяснить несколькими способами, и следовать тому, как отцы-основатели этой области развивали свои идеи, вряд ли удобнее всего. Например, многие научно-популярные книги о квантовой механике построены на объяснении феноменов вроде «корпускулярно-волнового дуализма», которые называются фундаментальными идеями, лежащими в основе всей теории. Это часто путает читателей и сбивает их с толку. Избежать этого нелегко, но я все же попытаюсь.

Глава 3. Вероятность и случай

Вы верите в судьбу?

Для большинства из нас смысл этого вопроса вполне очевиден: подразумевается, что некоторым событиям суждено произойти, а двум людям предначертано встретиться. Но есть ли в этой идее хоть толика правды?

Может, вам по душе читать гороскопы – довольно неправдоподобная идея, что положение планет может влиять на то, как сложится для вас грядущая неделя, кажется вполне безобидной. Само собой, большинство из нас не воспринимает гороскопы всерьез, однако мысль, что будущее можно предсказать, весьма интересна. На самом деле до квантовой революции ученые почти не сомневались, что в принципе это возможно, предполагая, что, пусть мы и не можем их предсказать, все события будущего тем не менее предопределены и предначертаны.

Исаак Ньютон полагал, что каждая частица во Вселенной должна подчиняться простым законам движения в результате действия четко определенных сил. Это механистическое представление о мире – которое ученые повсеместно разделяют и сегодня, почти три века спустя, – утверждает, что, какими бы сложными ни были природные явления, все в итоге всегда можно свести к взаимодействию фундаментальных кирпичиков материи. Естественный процесс, такой как шторм на море или перемена погоды, может казаться случайным и непредсказуемым, но это просто следствие его сложности и огромного количества задействованных в нем атомов.

Но в принципе, если бы мы знали точное положение и характер движения каждой

частицы в заданной системе, сколько бы их ни было задействовано, с помощью законов Ньютона мы могли бы предсказать, как эти частицы будут двигаться и взаимодействовать друг с другом, а следовательно, и как эта система будет выглядеть в любой конкретный момент будущего. Иными словами, точное знание настоящего должно позволять нам предсказывать будущее. Это привело к ньютоновской идее «механической» вселенной – такой вселенной, где вообще нет никаких сюрпризов, поскольку все, что может случиться, является результатом фундаментальных взаимодействий ее частей. Это учение получило название «детерминизм» (от лат. *determinare* – ограничивать, определять), поскольку будущее может быть полностью предопределено, если мы полностью знаем настоящее.

Само собой, на практике такой детерминизм возможен лишь в простейших системах. Мы прекрасно понимаем, что метеорологи не могут с полной уверенностью предсказать погоду на завтра. Мы даже не можем заранее узнать, выпадет орел или решка или куда закатится шарик рулетки. В современной физике есть отдельная область под названием теория хаоса, которая утверждает, что для определения будущей эволюции системы ее изначальное состояние необходимо знать с бесконечной точностью. Теория хаоса усложняет практическое применение детерминизма.

И правда, простые механические примеры вроде упомянутых выше меркнут в сравнении с тем, как нам необходимо разобраться в бесконечно сложном устройстве человеческого мозга, чтобы понять концепцию свободы воли. Но принцип всегда один: так как люди состоят из атомов, законы Ньютона должны быть применимы и к их мозгу. В связи с этим, когда мы делаем то, что считаем свободным выбором в отношении чего-то, на самом деле это лишь результат механических процессов и атомных взаимодействий в нашем сером веществе, которое подчиняется детерминистским законам, как и все остальное.

Хотя такой взгляд на вещи довольно печален, вам он может показаться вполне нормальным, поскольку мысль о том, чтобы обладать достаточной информацией, чтобы предсказывать будущее, и вовсе не укладывается в голове. Однако здесь возникает гипотеза: если бы у нас был достаточно мощный компьютер, снабженный достаточным объемом памяти, чтобы сохранить в нем сведения о положении и скорости каждой частицы во Вселенной, то он, вероятно, смог бы рассчитать, как Вселенная будет развиваться.

Одним из самых серьезных сдвигов в человеческом мышлении, произведенных квантовой революцией, стала идея индетерминизма – то есть исчезновения детерминизма вместе с концепцией механической вселенной. Поэтому, как ни жаль мне вам это сообщать, но еще три четверти века назад было доказано, что в качестве научной идеи «судьба» оказалась ложной.

Результат игры в пул

Представьте, как мы с помощью мощного компьютера пытаемся предсказать, что случится в игре в пул, делая предсказание в ту секунду, когда биток ударяется о пирамиду. Каждый шар на столе в этот момент начинает катиться в своем направлении, причем большая часть шаров претерпевает более одного столкновения и отталкивается от бортов. Само собой, компьютер должен знать точную силу первого удара битка и точный угол, под которым он сталкивается с первым шаром пирамиды. Но достаточно ли этого? Когда все шары наконец остановятся – а некоторые из них, возможно, даже закатятся в лузы, – насколько близким к реальности окажется предсказание компьютера? В то время как предсказать результат столкновения двух шаров вполне вероятно, учесть все сложные траектории движения множества шаров практически невозможно. Если хотя бы один шар покатится под немного иным углом, то другой шар, который он мог миновать в изначальной картине, теперь сможет коснуться его, в результате чего обе траектории существенным образом изменятся. И итоговый результат вдруг окажется совсем другим.

Похоже, нам необходимо сообщить компьютеру не только сведения о начальном состоянии битка, но и точное расположение остальных шаров на столе: касаются ли они друг

друга, каковы точные расстояния между ними и бортами и так далее. Но даже этого недостаточно. Крошечной пылинки на любом из шаров хватит, чтобы изменить его траекторию на некоторую долю миллиметра или чуть снизить его скорость. И снова это приведет к эффекту домино, который изменит итоговую расстановку. В теории хаоса это называется «эффектом бабочки» – идея заключается в том, что бабочка машет крыльями и тем самым едва заметно изменяет атмосферное давление, что в результате постепенно приводит к серьезному отклонению от того сценария, который развернулся бы, если бы бабочка не взмахнула крыльями, к примеру, вызывая несколько позже грозу на другом конце света, хотя в ином случае этой грозы не случилось бы.

Следовательно, нам нужно предоставить компьютеру точные данные о состоянии поверхности стола. Возможно, в некоторых местах сукно протерто сильнее. Минимальное влияние окажут даже температура и влажность воздуха.

И все же вам может показаться, что в этом нет ничего невозможного. Что в принципе это выполнимо. Само собой, если бы между шарами и столом не было трения, они бы продолжили сталкиваться и расходиться в разные стороны гораздо дольше, а следовательно, нам нужно было бы еще более точно знать изначальное положение шаров, чтобы определить, где они окажутся, наконец остановившись¹⁵.

«И что?» – скажете вы. В конце концов, раз уж мы никогда не сможем узнать все о конкретной системе, нам приходится высчитывать вероятности различных результатов. Чем больше мы знаем, тем с большей уверенностью мы можем сказать, что именно произойдет.

Иногда мы не можем сделать верное предсказание не только из-за собственной неосведомленности, но и из-за неспособности контролировать изначальные условия. Мы не можем даже дважды одинаково подбросить монетку, чтобы повторить полученный в первый раз результат. Пускай мы подбросили монетку и получили решку. Подбросить ее второй раз точно так же, чтобы она перевернулась то же самое количество раз и снова легла решкой вверх, очень и очень сложно.

И снова мы приходим к выводу, что у нас недостаточно информации о системе. В примере с игрой в пул я ни за что не смогу повторить удар и толкнуть биток точно таким же образом, чтобы добиться идентичного итогового результата, при котором все шары окажутся точно на тех же позициях, что и в первый раз. Тем не менее такая повторяемость является сутью ньютоновского мира. Такое детерминистское поведение представляет собой черту ньютоновой, или классической, механики. В квантовой механике все совершенно иначе.

Квантовая непредсказуемость

В квантовом мире царит серьезная непредсказуемость, которую мы не можем списать на свою неосведомленность о точном состоянии изучаемой системы или на практическую неспособность задать изначальные условия. На этом уровне она представляет собой фундаментальную характеристику самой природы. Мы не можем с уверенностью предсказать, что именно случится в квантовом мире не потому, что наши теории недостаточно хороши, и не потому, что нам недостает информации, а потому, что сама Природа функционирует «неопределенным» образом.

Часто выясняется, что в мире атомов мы можем лишь рассчитать вероятности различных результатов. Такие вероятности, однако, определяются не по тому же принципу, которым мы руководствуемся, когда определяем вероятность при броске монеты или игральные кости. Квантовые вероятности вплетены в саму теорию, и мы даже в принципе не можем определить их более точно.

Хороший пример представляет собой радиоактивный распад атомных ядер, при котором идентичные изначальные условия могут привести к разным результатам.

¹⁵ Они будут постепенно замедляться вследствие сопротивления воздуха и потери энергии из-за отдачи тепла и звука при столкновениях.

Представьте миллион идентичных радиоактивных атомных ядер, которые являются нестабильными и рано или поздно спонтанно «распадутся», при этом испустив частицу и перейдя в более стабильное состояние. В то время как квантовая механика позволяет нам рассчитать так называемый период полураспада (время, за которое распадется половина ядер), определить с ее помощью, когда распадется каждое конкретное ядро, мы не в состоянии. Знание периода полураспада приобретает хоть какую-то значимость, когда мы применяем его к статистически большому числу идентичных ядер. Можно рассчитать вероятность того, что ядро распадется через заданное время, однако более точные расчеты мы провести не в силах – и наша неосведомленность здесь ни при чем.

Решить эту дилемму можно, просто сказав, что квантовой механикой дело не ограничивается, а непредсказуемость радиоактивного распада действительно можно списать на нашу неосведомленность, поскольку нам не хватает более глубокого понимания Природы, с помощью которого мы могли бы точно предсказать, в какой именно момент распадется любое из ядер, точно так же как более полное знание о силах, участвующих в процессе подбрасывания монетки, позволило бы нам предсказать его результат. Если бы это было так, в поисках ответа нам пришлось бы выйти за границы квантовой механики. В шестой главе мы увидим, что таких взглядов придерживался Альберт Эйнштейн, который не мог смириться с тем, что квантовая механика словно бы утверждает, что на фундаментальном уровне наш мир по сути своей непредсказуем. И правда, одним из самых знаменитых высказываний Эйнштейна стало его замечание о том, что «Бог не играет в кости», которым он показал свое неприятие вероятностной концепции мира. Однако Эйнштейн ошибался.

Давайте внимательнее рассмотрим происхождение квантовой непредсказуемости и индетерминизма.

Обводящие удары

Мы понимаем, как окружающие нас объекты двигаются и взаимодействуют друг с другом под влиянием сил, и можем предсказывать их поведение в основном благодаря Исааку Ньютону. Помню, несколько лет назад в физическом журнале была напечатана статья, в которой с математической точки зрения анализировалась изогнутая траектория полета футбольного мяча. Бразильский футболист Роберто Карлос, фотография которого была напечатана на обложке журнала, известен своими выдающимися свободными ударами, совершая которые он умел заставить мяч полететь по более изогнутой траектории в облет защитной стенки, чем это было под силу большинству футболистов. Фокус – хотя вряд ли, конечно, Роберто Карлос подробно изучал все эти уравнения – заключался в том, как именно ударить мяч, чтобы он завертелся и в полете вступил во взаимодействие с воздухом. Точно так же годами совершенствовались мячи для гольфа, чтобы траекторию их полета можно было контролировать при определенном ударе. Само собой, есть и бесчисленное количество других примеров. Суть в том, что во всех случаях движения макроскопических объектов уравнения движения можно решить при наличии необходимых вводных данных. Если нам известны масса и форма тела, точная природа воздействующих на него сил, его точное текущее положение и скорость, то мы путем решения уравнений движения можем рассчитать его точное положение и скорость в любой момент будущего. В этом и заключается вся соль более ранней дискуссии о ньютонианском детерминизме.

Анатомия уравнения

Говоря о «решении» уравнения для классической частицы (а именно, той, что не подвержена квантовому поведению), мы имеем в виду, что применяем алгебру, для того чтобы найти значение точного положения и скорости этой частицы в определенный момент будущего. Но уравнение Шрёдингера отличается. Его решение, скажем, для движения электрона внутри атома представляет собой не просто набор чисел,

описывающих, где электрон будет находиться в любой конкретный момент (который мы бы получили, решая ньютоновы уравнения, описывающие движение Луны вокруг Земли).

Решение уравнения Шрёдингера гораздо полнее. Это математическая величина, известная под названием «волновая функция» и обозначаемая греческой буквой Ψ (пси). Если вы ищете корни всей квантовой странности, то вы их только что нашли: все они содержатся в волновой функции.

В элементарной алгебре всегда существует неизвестная величина x . Представьте, что x – это положение частицы: « x обозначает место», где нужно копать. В более продвинутой алгебре значение x может зависеть от значения второй неизвестной, скажем t , которой обычно обозначается время. Таким образом, если, к примеру, $t=1$, то x может быть равен 4,5, а если $t=2$, то $x=7,3$ и так далее. Само собой, я просто назвал эти цифры наугад. Так мы решаем уравнение движения для классической частицы. Вот только, так как частица существует в трехмерном пространстве, нам необходимы три числа, чтобы определить ее положение: x , y и z . Суть в том, что x , y и z – это просто символы, которые заменяют определенные числа, это не настоящие «величины».

Волновая функция в уравнении Шрёдингера немного похожа на них. Она представляет собой неизвестную величину и может быть вычислена для любого момента времени, чтобы описать состояние квантовой частицы. Под «состоянием» здесь я подразумеваю все, что мы вообще можем знать о частице.

В физике мы всегда пользуемся математическими символами, чтобы описать некоторую величину или свойство системы, которую мы изучаем. Мы обозначаем величину напряжения буквой V , давление – буквой P и так далее. Отличие квантовой механики заключается в том, что не существует прибора, который мог бы измерить квантовую функцию подобно тому, как мы измеряем давление и напряжение. Хотя концепция «давления» несколько абстрактна в том смысле, что это величина, которая описывает коллективное движение молекул газа, ее существование хотя бы можно ощутить физически. В отличие от существования волновой функции.

Diagram illustrating the components of the Schrödinger equation:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

Labels and their corresponding parts of the equation:

- Постоянная Планка** (Planck's constant) points to \hbar .
- Так называемый оператор Лапласа; величина, которая описывает, как волновая функция Ψ изменяется в пространстве** (Laplacian operator) points to ∇^2 .
- Математическая величина под названием «мнимое число»; равняется квадратному корню из минус единицы** (Imaginary unit) points to i .
- Масса описываемой частицы** (Mass of the particle) points to m .
- Описывает силы, действующие на частицу** (Describes forces acting on the particle) points to V .
- Описывает, как Ψ меняет форму с течением времени** (Describes how Ψ changes shape over time) points to $\frac{\partial \Psi}{\partial t}$.

Уравнения движения Ньютона действительно так точны и надежны, что с их помощью можно на много лет вперед предсказать орбитальное движение планет и их лун. Эти уравнения использовались НАСА для расчета траекторий ракет, летящих на Луну и обратно. Во всех вышеприведенных примерах определение текущего состояния физической системы и воздействующих на нее сил в принципе позволяет нам точно определить все будущие состояния этой системы.

Так почему мы не можем применить то же самое уравнение для описания движения микроскопической частицы вроде электрона? Если электрон в данный момент находится в определенной точке и мы применяем к нему некоторую силу, например включая электрическое поле, то мы должны быть в состоянии сказать наверняка, что через пять секунд он будет находиться в такой-то точке.

Но это не так. Оказывается, уравнения, описывающие движения окружающих нас объектов, от песчинок и футбольных мячей до планет, в квантовом мире бесполезны.

Самое важное уравнение физики

Серьезный вклад в развитие теоретического понимания квантовой механики внес австрийский физик Эрвин Шрёдингер, который взял идеи де Бройля и поставил их на твердое математическое основание. Важно отметить, что существует несколько математических способов описать поведение квантовой системы вроде электрона или атома, и подход Шрёдингера – лишь один из них. Однако именно так квантовую механику обычно преподают студентам-физикам и так я буду ее разбирать на страницах этой книги.

Шрёдингер решил проверить, можно ли с помощью идеи де Бройля о волнах объяснить модель атома Бора. Напомню, Бор предположил, что электроны в атомах двигаются по фиксированным (квантованным) орбитам, но никто не знает, почему так происходит. Шрёдингер предложил новое уравнение, которое описывает не принцип движения частицы, а принцип разворачивания волны. В результате у него получилось волновое уравнение.

В наши дни авторы научно-популярных книг об идеях современной физики, как правило, обходят стороной все математические уравнения, кроме $E=mc^2$, о котором я уже упоминал. Но уравнение Шрёдингера заслуживает хотя бы краткого обзора (см. формулу на странице 64), пускай и из эстетических соображений¹⁶.

Результатом решения уравнения Шрёдингера является математическая величина, называемая волновой функцией. Именно здесь и проявляется вся вероятностная природа квантовой механики. В случае с электроном, к примеру, волновая функция не дает нам его точного положения в конкретный момент времени и раскрывает лишь вероятность того, что электрон окажется в том месте, где мы будем его искать. Само собой, вы сразу подумали: но этого мало! Сложно поверить, что мы не можем получить никакой более точной информации, чем сообщение о том, где может находиться электрон. Конечно, прочитав это, вы все равно ничего не поняли. Поэтому я постараюсь объяснить лучше.

Волновая функция содержит большое количество информации. В любой момент времени она обладает значением для каждой точки в пространстве. Так что, в отличие от положения в пространстве классической частицы, волновая функция распространяется на все пространство – отсюда и термин «волновая». Но не стоит думать, будто она представляет собой настоящую физическую волну наподобие волны света. Тут я должен признаться, что на самом деле никто не знает, что такое волновая функция. Большинство физиков считает ее абстрактной математической сущностью, которую можно использовать для получения информации о природе. Другие относят ее к ее собственной, очень странной отдельной реальности. В шестой главе мы увидим, что обе эти точки зрения могут быть одинаково справедливы. Как ни странно, важнее всего, что, вне зависимости от того, реальна волновая функция или нет, ее математические свойства остаются неизменными, а в том, что она может сообщить нам о поведении природы на субатомном уровне, нет никаких сомнений.

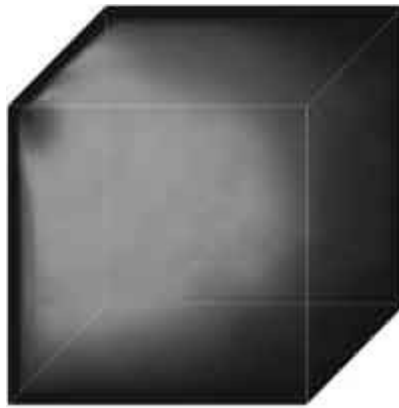
Давайте в качестве примера возьмем единственный электрон, заключенный в коробку. Представим, что мы точно знаем его изначальное положение, и введем эту информацию в уравнение Шрёдингера. Таким образом мы сможем рассчитать его волновую функцию для более позднего момента. Теперь давайте представим, что мы ввели в компьютерный файл или записали на бумаге массив чисел, которые представляют собой значения волновой функции электрона для разных точек сетки внутри коробки. Использовать эту информацию, чтобы с некоторой степенью уверенности определить местоположение электрона, мы уже не сможем. Вместо этого нам придется довольствоваться знанием того, где он окажется с наивысшей степенью вероятности. Это делается следующим образом.

Волновая функция описывает каждую точку пространства двумя числами. Вероятность того, что электрон находится в непосредственной близости от этой точки, представляет собой сумму квадратов этих чисел¹⁷. Я говорю это, чтобы вы поняли, что сама по себе волновая функция не является вероятностью, сначала ее надо возвести в квадрат¹⁸.

¹⁶ Другой вопрос, захотят ли подростки носить *футболку* с волновым уравнением на груди. Впрочем, в такой футболке, пожалуй, можно встретить разве что ботаника.

¹⁷ Математически это объясняется тем, что волновая функция представляет собой так называемую «сложную функцию», а следовательно, обладает как «действительной», так и «мнимой» частью, но вдаваться в подробности я не буду.

¹⁸ Заранее не угадаешь, когда у тебя в руках окажется волновая функция. Будет обидно не знать, что с ней делать.



Вероятность распределения электрона, заключенного в коробке. Это не физическое облако, описывающее «размазанный» электрон, а математическое облако вероятности. Если мы знаем наверняка, что электрон изначально находился в одном из верхних углов коробки, то его волновая функция вскоре распространится на весь объем коробки. Однако большая плотность вероятностного облака, рассчитанная на основании волновой функции, скажет нам, что электрон до сих пор, *скорее всего*, будет найден в непосредственной близости от своего изначального местоположения. С течением времени вероятностное облако распределится более равномерно, и электрон можно будет с равной вероятностью найти в любой точке коробки.

Вероятностная природа, а следовательно, и неотъемлемая непредсказуемость квантовой механики требует более подробного обсуждения сущности волновой функции. Например, можно объяснить вам, как волновая функция изменяется со временем, используя удачную аналогию.

Грабителя только что выпустили из тюрьмы, но местная полиция уверена, что он не завязал со своим криминальным прошлым, и может следить за его возможными перемещениями по городу, постоянно изучая карту. Хотя полицейские не могут установить его точное местоположение в конкретный момент времени, они могут определить вероятность совершения ограблений в разных районах. Сначала в зоне наивысшего риска оказываются дома возле тюрьмы, но с течением времени опасная область расширяется. Также можно с некоторой долей уверенности сказать, что богатые районы города с большей вероятностью попадают под удар, чем бедные. Эту волну совершаемых одним человеком преступлений можно считать волной вероятности. Она неосвязаема и нереальна, это просто набор абстрактных чисел, присвоенных каждому району города. Точно так же волновая функция распространяется во все стороны из той точки, где в прошлый раз был замечен электрон, и позволяет нам определять вероятность того, где он окажется впоследствии.

Вскоре полицейские получают информацию об ограблении, совершенном по определенному адресу, и понимают, что их подозрения были верны. Это изменяет распределение вероятностей, поскольку теперь они знают, что вор не мог уйти далеко от места преступления. Точно так же, если электрон засекают в определенном месте, то его волновая функция тотчас изменяется. В момент обнаружения вероятность нахождения электрона в другом месте равняется нулю. Если снова выпустить его из поля зрения, его волновая функция снова распространится.

Что происходит, когда мы не смотрим?

Однако между примерами с грабителем и электроном есть огромная разница. Хотя полицейские могут лишь определить вероятность, с которой грабитель находится в том или ином месте, они понимают, что это происходит из-за нехватки информации. В конце концов, грабитель не «распространяется» по городу, и, несмотря на то что полиция может полагать, что он находится где угодно, на самом деле он, само собой, находится лишь в одном месте в

каждый конкретный момент. Это так очевидно, что мне даже кажется лишним вам об этом сообщать. Но что насчет электронов? Большинство физиков полагает – и не без причины, как мы увидим в нескольких следующих главах, – что тогда, когда мы не отслеживаем движение электрона, описать его мы можем только при помощи волновой функции. Более того: электрон сам по себе даже не существует в качестве обычной частицы, положение которой точно определено в каждый момент времени. Его влияние распространяется в пространстве. Узнать, почему так происходит, мы не в состоянии. У нас есть только волновая функция, а она представляет собой лишь набор чисел (конечно же, физически значимых). Как только мы смотрим, волновая функция, как считается, «схлопывается» и электрон становится локализованной частицей.

Это может показаться вам смешным и даже абсурдным. Почему электрон просто не может всегда вести себя, как настоящая частица? Хотя мы и не можем с уверенностью сказать, что он делает, пока мы не смотрим, это ведь явно не означает, что он не делает ничего? Что ж, если вы так думаете, вы не одиноки: Эйнштейн мыслил сходным образом. Однако большинство физиков уверены, что эта удобная картина неверна. Тем не менее значительное и растущее меньшинство уже сомневается в этом, о чем я подробнее расскажу в Главе 6.

Вернемся к нашей простой аналогии и термину «волна преступности». Он подразумевает нечто колеблющееся, обладающее пиками и впадинами, как рябь на поверхности пруда. Выходящие из одной точки волны распространяются концентрическими кругами (как от брошенного в воду камня). Квантовая волновая функция тоже должна быть «волнистой», иначе мы не увидим волнообразное свойство интерференции в фокусе с двумя прорезями. На этом этапе вас уже не должно удивлять, что фокус с двумя прорезями как-то связан со свойствами волновых функций.

На самом деле волновая функция не просто колеблется, как водяная волна. Она ведет себя гораздо сложнее. Я упоминал, что в каждой точке пространства волновая функция определяется двумя числами, известными как ее действительная и мнимая части. Совокупность всех «действительных» чисел дает нам одну волну, а совокупность «мнимых» – другую, и волновая функция представляет собой их комбинацию. Кроме того, типичная волновая функция при построении на графике будет иметь довольно сложную форму, зависящую от описываемой системы. Единичный электрон, заключенный в коробке, само собой, будет описываться достаточно простой волновой функцией. Но волновая функция, описывающая структуру атомного ядра, включающего в себя множество протонов и нейтронов, подчиняющихся сложным правилам, тоже будет гораздо более сложной.

Принцип неопределенности Гейзенберга

Одним из важнейших следствий вероятностной природы волновой функции является идея неопределенности. Не стоит путать ее с уже знакомым нам индетерминизмом, который утверждает, что знание определенных аспектов состояния частицы, в частности ее положения в конкретный момент времени, не подразумевает, что существует возможность с уверенностью определить ее будущее положение. Идея неопределенности подразумевает, что мы не можем одновременно с точностью знать все о квантовой системе, даже если попытаемся измерить все ее характеристики.

Самый известный пример неопределенности дает соотношение, впервые открытое Вернером Гейзенбергом. Свободно перемещающийся в пространстве электрон может находиться где угодно; мы говорим, что его положение бесконечно неопределенно. Но положение электрона, заключенного внутри очень маленькой коробки, достаточно хорошо известно, так что неопределенность его положения довольно мала. Это означает, что числа, связанные с его волновой функцией, будут равняться нулю везде, за исключением внутреннего пространства коробки. Такую волновую функцию называют локализованной в пространстве.



Принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что мы не можем одновременно знать и точное положение, и импульс квантовой частицы. Это странное свойство природы, позволяющее нам знать либо один, либо другой аспект, но не оба сразу, привело Нильса Бора к открытию принципа дополнительности, который гласит, что оба как будто бы противоречащих друг другу аспекта необходимы для полного описания квантовой частицы.

Контуры этой вазы можно также считать силуэтами двух человеческих лиц, смотрящих друг на друга. Однако одновременно видеть оба аспекта изображения проблематично: если мы видим два лица, то нет вазы; если же перед нами ваза, то нет лиц.

Пока что я описывал так называемую «волновую функцию в координатном представлении» (на основании которой можно рассчитать вероятность обнаружения электрона в различных точках координат). Существует и другая величина, называемая волновой функцией в импульсном представлении, которая сообщает нам, с какой вероятностью электрон обладает определенным импульсом, или скоростью, в каждый конкретный момент времени. Если нам известна волновая функция в координатном представлении, мы можем вывести волновую функцию в импульсном представлении (и наоборот), используя математическую процедуру, называемую преобразованием Фурье. Локализованная волновая функция в координатном представлении всегда дает распространенную волновую функцию в импульсном представлении¹⁹, и наоборот. Таким образом, электрон, обладающий локализованной волновой функцией в координатном представлении, а следовательно, низкой неопределенностью своего положения, всегда имеет высокую неопределенность импульса (или скорости). Точно так же электрон, скорость которого достаточно хорошо известна (на основании локализованной волновой функции в импульсном представлении), обязательно будет обладать распространенной волновой функцией в координатном представлении, из-за чего его положение будет в высокой степени неопределенным.

В этом и заключается суть принципа неопределенности Гейзенберга. В своей математической форме он гласит, что никто не может одновременно знать точное положение и скорость электрона (или любой другой квантовой сущности). Однако не верьте книгам, в которых сказано, что это происходит в результате того, что экспериментатор случайным образом подталкивает электрон путем определения его положения, тем самым изменяя его скорость и направление движения. Скорее это является следствием природы волновых функций, которые описывают возможное положение и состояние движения электрона, даже когда мы на него не смотрим.

Физики до сих пор не могут сойтись во мнении, обладает ли электрон определенным положением и скоростью в любой момент времени, пока мы на него не смотрим. Правда

¹⁹ Но здесь я не имею в виду, что она распространена в пространстве. Скорее она позволяет импульсу принимать одно из распространенного диапазона возможных значений.

заключается в том, что соотношение неопределенности представляет собой следствие взаимодействия двух типов волновых функций, а раз уж волновые функции сообщают нам все, что мы вообще можем узнать об электроны, больше нам сказать здесь нечего. Принцип неопределенности накладывает ограничение на то, что мы можем предсказать о квантовом состоянии, а следовательно, и узнать о нем при непосредственном наблюдении.

Ядерные облака

В физике существует множество явлений, которые просто невозможны согласно классической механике и которые следует объяснять при помощи принципа неопределенности Гейзенберга. Один из примеров представляет собой моя сфера исследований в ядерной физике. В Главе 7 я объясню, что атомное ядро представляет собой одну из самых сложных физических систем. С момента его открытия прошло практически сто лет, а мы до сих пор узнаем все новые и новые его секреты. Именно в нем доминируют законы квантовой механики.

Позже мы внимательнее посмотрим внутрь ядра атома и увидим, что частицы, из которых оно состоит, то есть протоны и нейтроны, удерживаются вместе благодаря сильному ядерному взаимодействию. На очень коротких расстояниях эта сила действует подобно клею, но за поверхностью ядра ее влияние полностью пропадает.

Ядра самых легких элементов, как правило, имеют одинаковое количество положительно заряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов. Ядра, в которых содержится больше среднего для их массы количества либо протонов, либо нейтронов, как правило, нестабильны и быстро трансформируются в более стабильную форму, превращая лишние протоны в нейтроны или наоборот, чтобы изменить баланс.

В середине 1980-х годов в ходе экспериментов японской исследовательской группы, проводившихся в Лаборатории Лоуренса в Беркли (Калифорния), было открыто новое свойство очень богатых нейтронами ядер элемента лития. Ядра атомов стабильных форм лития содержат три или четыре нейтрона, связанных с тремя протонами. Проведенный в Беркли эксперимент показал, что размер ядра лития-11 (три протона плюс восемь нейтронов) гораздо больше, чем ожидалось и чем можно было списать на появление дополнительных нейтронов. Направив в ускорителе пучок таких ядер на тонкую углеродную пластинку, ученые смогли измерить, сколько ядер выдержало взаимодействие с углеродом и оказалось по другую сторону пластинки. Чем больше были ядра лития-11, тем больше была вероятность, что они столкнутся с ядрами углерода и расколются на части. Ожидалось, что многие ядра сумеют без проблем пройти сквозь пластинку, однако на другой ее стороне детекторы засекли гораздо меньше ядер, чем предсказывалось. Здесь можно провести грубую аналогию с просеиванием песка сквозь сито. Чем больше песчинки, тем меньше их проходит насквозь.

Теоретики вскоре поняли, что они имеют дело с ядрами, которые не похожи на другие ядра, существующие в природе. Два внешних нейтрона лития-11 очень слабо связаны с остальной частью ядра (его «сердцевиной») и большую часть времени находятся относительно далеко от этой сердцевины. На самом деле они парят за пределами радиуса действия ядерной силы, которая удерживает их на месте, и образуют так называемое «нейтронное облако». Само собой, объем этого облака все равно гораздо меньше того объема, который занимают электроны атома лития.

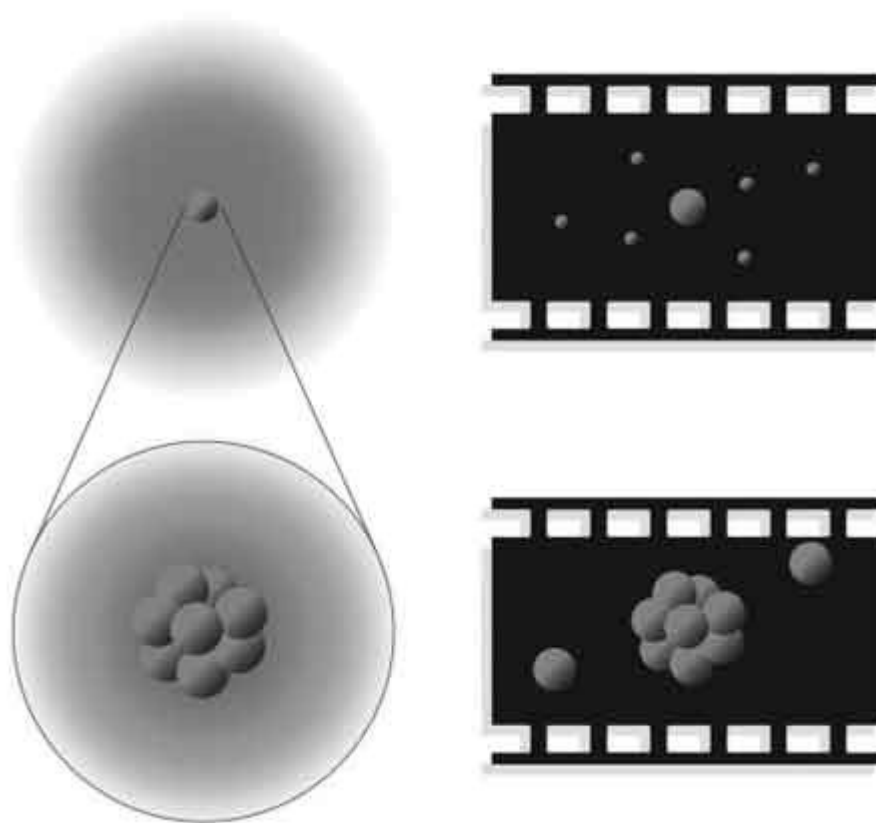
Нейтронное облако представляет собой исключительно квантовый феномен и не должно существовать согласно классической механике²⁰. Однако я использовал для описания этих облачных нейтронов тот же язык, которым Бор излагал свою старую квантовую теорию об электронах на орбите. Теперь мы знаем, что это не совсем правильно. Так что позвольте мне описать все точнее.

²⁰ В естественном состоянии они крайне нестабильны и существуют около одной десятой секунды.

Чтобы объяснить большой размер ядерных облаков менее прямолинейно, можно прибегнуть к принципу неопределенности. Для их изучения был проведен другой эксперимент, в котором их намеренно раскалывали в ходе ядерной реакции и следили, как разлетаются фрагменты. Было замечено, что, разлетаясь, осколки оставались довольно близко друг к другу и очень медленно расходились в разные стороны.

С квантовомеханической точки зрения, можно сказать, что изначальный импульс фрагментов имеет очень узкий диапазон в районе нуля, или в высокой степени локализованную волновую функцию в импульсном представлении. Так как фрагменты (два нейтрона и сердцевина) связаны очень слабо, расколоть такое ядро несложно. Таким образом волновая функция в импульсном представлении, которая описывает их относительное движение после раскола ядра, не слишком отличается по форме от той волновой функции, которая описывает целое ядро.

Принцип неопределенности сообщает нам, что эта волновая функция в импульсном представлении соответствует очень распространенной волновой функции в координатном представлении, а следовательно, и широкому диапазону распределения вероятностей. Таким образом, нейтронное облако представляет собой не два «размазанных» нейтрона, а большой объем пространства вокруг ядра, в котором эти нейтроны могут быть найдены с высокой вероятностью. Это вероятностное облако нейтронов.



Квантовое описание атома сводится к вероятностному облаку электронов, окружающему крошечное ядро (вверху слева). Однако так мы можем сказать только *до того, как посмотрим* на атом. Если бы мы могли сделать снимок атома (вверху справа), то мы бы увидели отдельные электроны в конкретных местах. Нейтронное облако точно такое же. Это не более чем вероятностное облако нейтронов (внизу слева). Тот факт, что оно сильно выходит за границы сердцевинки ядра, означает, что, сумей мы сделать фотографию ядра (внизу справа), мы бы, скорее всего, обнаружили «облако» нейтронов на некотором расстоянии от всех остальных, более тесно связанных друг с другом нейтронов и протонов ядра.

Золотые годы квантовой механики

В период с 1925 по 1927 год в квантовой физике произошла гораздо более значительная революция, чем та, которую на заре нового века начал Планк. В 1922 году Нильс Бор получил Нобелевскую премию за «заслуги в исследовании строения атомов и испускаемого ими излучения». Но к этому моменту сразу несколько молодых европейских физиков, работая над своими докторскими диссертациями, стали задаваться вопросом, можно ли считать теорию Бора о проквантованных электронных орбитах окончательной. В то время тремя великими магистрами атомной теории считались работавший в Копенгагене Бор, Арнольд Зоммерфельд из Мюнхена и Макс Борн из Геттингена. Но серьезный вклад в науку было суждено сделать их студентам.

До 1925 года физики знали, что основной проблемой атомной теории Бора²¹ была ее неспособность описать взаимодействие двух электронов внутри атомов при помощи идеи орбит Бора. Его уравнения отлично работали в случае с атомом водорода, содержащим всего один электрон, но атомную структуру следующего за ним элемента, гелия, который обладал уже двумя электронами, описать с их помощью было невозможно. Один из дерзких юношей, Вольфганг Паули, в мае 1925 года так описал это отчаянное положение в своем письме коллеге:

«Физики сейчас снова стоят в тупике. В любом случае, для меня все это слишком сложно – жаль, я не какой-нибудь актер-комик, который вообще никогда в жизни не слышал о физике».

Первый прорыв был совершен молодым немцем Вернером Гейзенбергом, который, несмотря на свой блестящий ум, в 1923 году едва не провалил свои экзамены на докторскую степень. Летом 1925 года, выздоравливая после приступа сенной лихорадки на немецком острове Гельголанде, он существенно продвинулся в формулировке новой математической теории. В то же время в Геттингене Макс Борн и его молодой ассистент Паскуаль Йордан представили статью, в которой они предположили, что «истинные законы природы должны быть связаны лишь с теми величинами, которые можно наблюдать». Как только Гейзенберг вернулся в Геттинген и услышал об их работе, он включил ее в свою теорию и заявил, что старая теория Бора-Зоммерфельда не может быть верной, так как она основана на величинах, наблюдать которые невозможно, в частности на орбитах электронов. Его теория гласила, что физическим значением обладают лишь те величины, к примеру, заряды электронов, которые можно непосредственно измерить.

К сентябрю 1925 года Гейзенберг, Борн и Йордан вывели новую теорию квантовой «механики». Их идея основывалась на довольно странном наборе математических соответствий. По сути, результат перемножения двух величин, скажем, A , умноженное на B , не равен B , умноженному на A . С обычными числами это, конечно, не работает: 3 умножить на 4 не равно 4 умножить на 3 . Но величины в их теории следовали иному правилу перемножения, которое уже было хорошо знакомо математикам и свойственному для величин под названием матрицы. Очень скоро эта новая теория стала называться матричной механикой. Ее обычно связывают с именем Гейзенберга, но на самом деле нельзя недооценивать вклад Борна и Йордана. Объемная работа трех ученых под названием «К вопросу о квантовой механике. Часть II»²² была опубликована в феврале 1926 года.

²¹ Которую Зоммерфельд впоследствии расширил и обобщил, чтобы включить помимо простых кольцевых орбит Бора также эллиптические электронные орбиты.

²² Более раннюю статью «О квантовой механике» Борн и Йордан опубликовали тремя месяцами ранее без участия Гейзенберга.

Другие молодые физики, включая Паули и Дирака, помогли прояснить многие вопросы новой теории и в итоге внесли свой вклад, за который тоже удостоились Нобелевских премий. Гейзенберг получил Нобелевскую премию в 1932 году.

В то же время, в январе 1926 года, австриец Эрвин Шрёдингер представил свою первую статью, описывающую альтернативный подход. Его атомная теория отталкивалась от идеи де Бройля о волнах материи и давала точно те же результаты, что и теория Гейзенберга. Его версия стала известна как волновая механика. Однако, в отличие от де Бройля, Шрёдингер отказался от идеи, что частицы материи, такие как электроны в атомах, имеют связанные с ними волны, и заявил, что только волны и являются реальными.

Волновая механика Шрёдингера и его знаменитое уравнение тотчас добились успеха. Его подход большинству физиков показался проще матричного формализма Гейзенберга.

Обычно считается, что Дирак первым доказал эквивалентность теорий Шрёдингера и Гейзенберга (фактически они описывали одно и то же разным языком). На самом деле первым это продемонстрировал Паули – в письме, которое было опубликовано лишь через много лет после его смерти.

Весной 1927 года Гейзенберг опубликовал свой знаменитый принцип неопределенности, которым он был во многом обязан своим дискуссиям с Бором и Паули. Однако многие забывают, что принцип неопределенности принципиальным образом опирался на волновую механику. И это несмотря на то, что Гейзенберг, как и многие другие ведущие физики того времени, выступал с серьезной критикой теории Шрёдингера.

Сегодня можно сказать, что студенты-физики изучают подход Шрёдингера, в то время как практикующие физики-теоретики, как правило, используют комбинацию матричной и волновой механики. В 1933 году Шрёдингер разделил Нобелевскую премию с Полем Дираком.

Радиоактивный распад

Рон Джонсон, почетный профессор физики, Университет Суррея

Среди множества успехов квантовой механики одним из самых выдающихся, пожалуй, можно назвать ее объяснение феномена радиоактивности. Ньютоновская картина мира частиц с определенными в любой момент времени координатами и скоростью делает четкое, но совершенно неверное предсказание о сроке жизни ядра в период альфа-распада. Неважно, сколько раз любые протоны и нейтроны ядра объединяются в альфа-частицу конфигурации 2 протона и 2 нейтрона, Ньютон утверждает, что вырваться из атома альфа-частица никак не может!

Альфа-частицу в радиоактивном ядре можно сравнить с шариком, который катается по дну чаши. Шарик, катающийся с той же скоростью по столу за пределами чаши, будет обладать такой же энергией, однако ньютоновская механика категорически отрицает возможность внезапного перемещения шарика из чаши на стол. Чтобы это перемещение состоялось, нам необходимо временно снабдить шарик некоторым количеством дополнительной энергии, чтобы он сумел перебраться через борт. Но в случае с шариком размером с альфа-частицу в чаше размером с ядро дело обстоит совершенно иначе.

Диаметр типичного радиоактивного ядра составляет около 0,000000000000015 метра (15 фемтометров), а альфа-частица примерно в 4 раза меньше. Эти величины так малы в сравнении с размерами шарика и чаши, что нет ничего удивительного в том, что ньютоновская картина здесь не находит применения. В квантовой механике альфа-частицу не описать, ответив на вопросы, где она находится и насколько быстро движется. Само собой, задать эти вопросы можно, а соответствующие измерения дадут необходимые ответы, однако составить более полную картину поможет ее волновая функция. Чтобы определить, какова эта волновая функция, мы обращаемся к уравнению Шрёдингера (см. формулу на странице

64), как обратились бы к уравнению Ньютона в случае с шариком в чаше. Изучая новую область Вселенной, не стоит удивляться, что физикам порой приходится использовать другие инструменты.

Уравнение Шрёдингера предсказывает, что для чаши размером с ядро волновая функция альфа-частицы может простираться на очень большие расстояния за пределы ядра. Это происходит, потому что волновые функции обладают волнообразными свойствами, а следовательно, не скованы теми же правилами, что частицы. Значение волновой функции в определенной области пространства дает нам вероятность обнаружения там альфа-частицы. Следовательно, если уравнение Шрёдингера предсказывает, что волновая функция альфа-частицы простирается далеко за пределы ядра, значит, ядро может «подвергнуться распаду». Уравнение Шрёдингера предсказывает, что это случится только при определенном уровне энергии. Согласно эйнштейновскому уравнению $E=mc^2$ этот уровень энергии достигается, когда ядро обладает определенной массой.

Ньютоновское предсказание вероятности распада равняется ровно нулю даже при нужном уровне энергии, что не только не объясняет наблюдаемые в радиоактивных ядрах явления, но и идет вразрез со множеством других предсказаний, которые можно сделать на основании волновой функции альфа-частицы. Например, с ее помощью можно предсказать «период полураспада» ядра и его зависимость от массы ядра и количества содержащихся в нем нейтронов и протонов. Период полураспада представляет собой лишь один аспект вероятностного диапазона альфа-частицы. Остальные процессы, включая взаимодействие альфа-частиц и ядер, обращаются к другим его аспектам.

Квантовую механику часто ругают за то, что она не может предсказать тот миг, в который конкретное ядро выпустит альфа-частицу. Впрочем, учитывая, что квантовая механика дает нам столько важной информации, эта критика кажется настоящей придиркой, ведь ньютоновская картина вообще не допускает возможности распада!

Глава 4. Причудливые связи

Если вам показалось, что обсуждение волновых функций в предыдущей главе было немного абстрактным и даже излишним, то вам, возможно, стоит вернуться к первой главе, чтобы напомнить себе, с чем мы здесь имеем дело. В этой главе мы подробнее изучим странные идеи квантовой механики. В их основе лежит волновая функция. Конечно, я согласен, связать необычные свойства абстрактной математической величины вроде волновой функции с реальным миром весьма нелегко. Хотя мы и располагаем математическими формулами, которые позволяют нам рассчитать и предсказать свойства атома, это не значит, что волновая функция представляет собой математическое описание самого атома или – еще того хуже – что она и есть атом. Нам известно лишь одно: как бы то ни было, квантовый мир очень необычен. Но во второй половине этой книги вы узнаете, что квантовая механика очень точно описывает эту необычность.

Когда я пытаюсь объяснить физику своей жене Джули, ее взгляд обычно затуманивается, и она не особенно пытается подавить зевоту. Так что, когда несколько лет назад мне удалось завладеть ее вниманием, я не упустил свой шанс. Мы должны были встретиться с друзьями в небольшом винном баре, но, сев за столик и сделав заказ, получили от них сообщение, что они прийти не смогут. Тем вечером мы отправили детей к бабушке с дедушкой, и отказываться от возможности побыть свободными нам совсем не хотелось. Мы, как обычно, немного помечтали о большом доме на берегу и поболтали о том, в какой цвет покрасить ванную, а потом в нашем разговоре возникла пауза.

Тут я объявил, что настало время объяснить таинства квантового мира и фокуса с двумя прорезями. Как ни удивительно, Джули согласилась меня выслушать и даже не сделала ни одного саркастичного комментария. Где-то через час (когда мы прикончили бутылку-другую

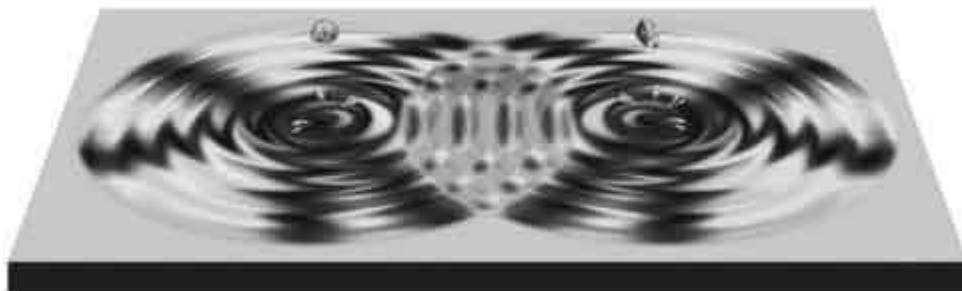
чилийского красного) я эффектно закончил свой рассказ, уверенный, что теперь она наконец-то восхитится полным чудес субатомным миром и проникнется уважением к своему умному мужу. Однако она лишь недоверчиво посмотрела на меня и, покачав головой, сказала: «Знаешь, это просто бред. Не верю ни единому слову!» Что мне было ответить? Логически объяснить квантовую механику и прийти к неопровержимым доказательствам просто невозможно. А прямо на месте убедить жену, что в эксперименте с двумя прорезями действительно возникает картина интерференции, я не мог.

Но я не удивился и не разочаровался. В конце концов, физики три четверти века пытались понять квантовую механику и не особенно преуспели в этом. Я изучал ее много лет, но время от времени недоумеваю до сих пор. Я понимаю, как использовать ее законы, и – учитывая область моей специализации – знаю, как применять ее математический аппарат для изучения поведения и свойств атомного ядра. Однако спроси меня, что все это означает, и я буду столь же озадачен, как и любой другой. От вас меня отличает лишь то, что я точно уверен в отсутствии простого ответа на этот вопрос и очевидного, интуитивно понятного объяснения.

В прошлой главе мы выяснили, что вероятностная природа квантовой механики проистекает из свойств волновой функции, а теперь перейдем к другим, еще более странным феноменам со столь же интригующими названиями.

Суперпозиция

Феномен суперпозиции характерен не только для квантовой механики, это общее свойство всех волн^[23]. Представьте, что наблюдаете за человеком, который ныряет в пустой бассейн^[24]. Вы увидите на поверхности воды рябь, которая волнами дойдет до противоположного конца бассейна. Когда в бассейне много людей, которые брызгаются и плавают, картина совершенно иная. Поверхность воды неспокойна из-за совокупного эффекта множества помех. Такое наложение разных волн и называется суперпозицией. Картина интерференции, которую мы наблюдаем в фокусе с двумя прорезями со светом, представляет собой прямое следствие суперпозиции световых волн, проходящих сквозь две прорези. Нам необходимо выяснить, происходит ли такой же процесс, когда сквозь прорези проходят атомы.



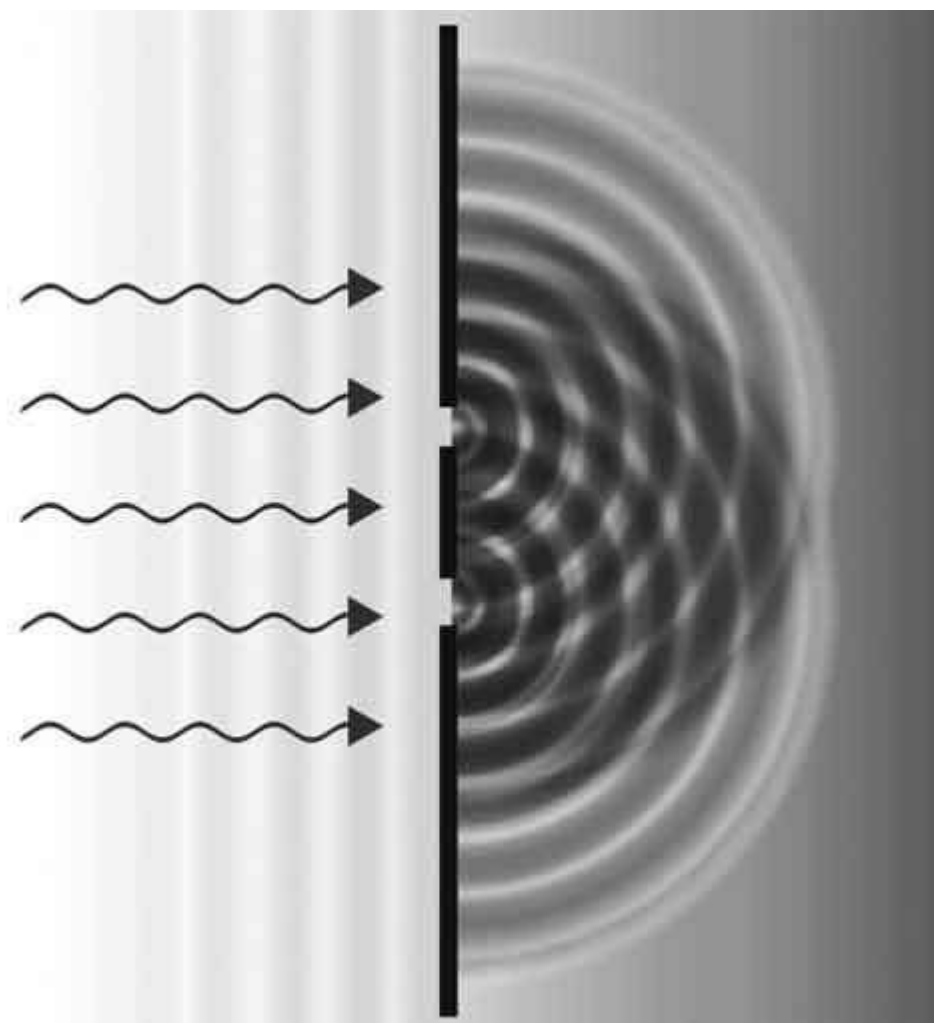
Суперпозиция волн: если в пруд недалеко друг от друга бросить два камня, от каждого из них в разные стороны распространятся волны, которые в итоге встретятся и сформируют суперпозицию. Из-за интерференции картина этой суперпозиции будет существенно отличаться от картины, образуемой двумя наборами концентрических кругов.

Так что же происходит, когда каждый атом достигает экрана с двумя прорезями? Может, он постепенно превращается в объемное облако, которое затем проходит сквозь обе прорези одновременно? Но это не объясняет интерференции. Для нее необходима волнообразная структура. Не забывайте, в нашем распоряжении – для описания состояния атома, когда мы за ним непосредственно не наблюдаем, – лишь волновая функция, которую мы рассчитываем

посредством решения уравнения Шрёдингера. Оказывается, что это уравнение обладает тем же математическим свойством, что и все остальные «волновые» уравнения, то есть оно позволяет сложить вместе все его различные решения, чтобы получить новые решения. Точно так же, как в случае с суперпозицией водяных или световых волн, возможна и суперпозиция волновых функций.

Здесь возникает следующая концептуальная сложность. Представьте волновую функцию, которая описывает электрон с определенной энергией. Если электрон^[25] замедляется и у него остается лишь половина изначальной энергии, то его волновая функция, само собой, меняется. Однако из-за возможности суперпозиции двух различных волновых функций, описывающих электрон с разной энергией, электрон может пребывать и в состоянии, которое описывается третьей волновой функцией. Эта новая волновая функция представляет собой... а точнее, в каждой точке пространства обладает значением, которое является суммой первых двух волновых функций: той, которая описывает быстро движущийся электрон, и той, которая описывает медленно движущийся электрон. Это означает, что каждый электрон пребывает в таком состоянии, в котором он одновременно двигается и быстро, и медленно. И тут важно заметить, что он не обладает какой-то средней скоростью, а находится в двух состояниях движения – или обладает двумя разными энергиями – одновременно!

Хуже того, электрон может пребывать в состоянии, которое можно описать волновой функцией, представляющей собой сумму двух и более волновых функций, каждая из которых описывает электрон в разных местах. Таким образом итоговая волновая функция теперь говорит нам, что электрон должен быть более чем в одном месте одновременно! Не волнуйтесь, я уже чувствую ваш скептицизм. В конце концов, я настаиваю, что волновая функция сама по себе не является физической сущностью, а представляет собой лишь ее математическое описание. В любом случае, при наблюдении за электронами мы никогда не увидим такого странного положения вещей. При наблюдении мы увидим каждый из электронов только в одном месте, а при измерении их энергии выясним, что они обладают только одной из всех возможных энергий. Так, может, вся эта история с суперпозицией – лишь математический курьез, а не свойство настоящих частиц?



Световые волны, направленные на две прорези в Главе 1, подобны океанским волнам, которые набегают на берег. По другую сторону экрана каждая из прорезей становится новым источником света, из которого распространяются полукруглые волны. Это приводит к суперпозиции, из-за которой на втором экране проявляется картина интерференции.

К примеру, было бы здорово, если бы волновая функция просто описывала статистическое распределение возможных состояний электрона. В таком случае, если бы мы проверили тысячу идентичных электронов, описываемых одной и той же полученной в результате суперпозиции волновой функцией, примерно половина из них оказалась бы в первом состоянии, а другая половина – во втором. Может, нам и не стоит волноваться? При наблюдении ни один электрон никогда не бывает в двух местах одновременно.



Вероятностное распределение электрона в коробке. (Для простоты коробка представлена в виде двухмерной пластины, так что вертикальную ось можно использовать для определения плотности вероятности – чем выше пик, тем более вероятно, что электрон будет обнаружен в этом месте.)

Вверху: Электрон точно находится где-то в ближнем левом углу.

В середине: Электрон точно находится где-то в дальнем правом углу.

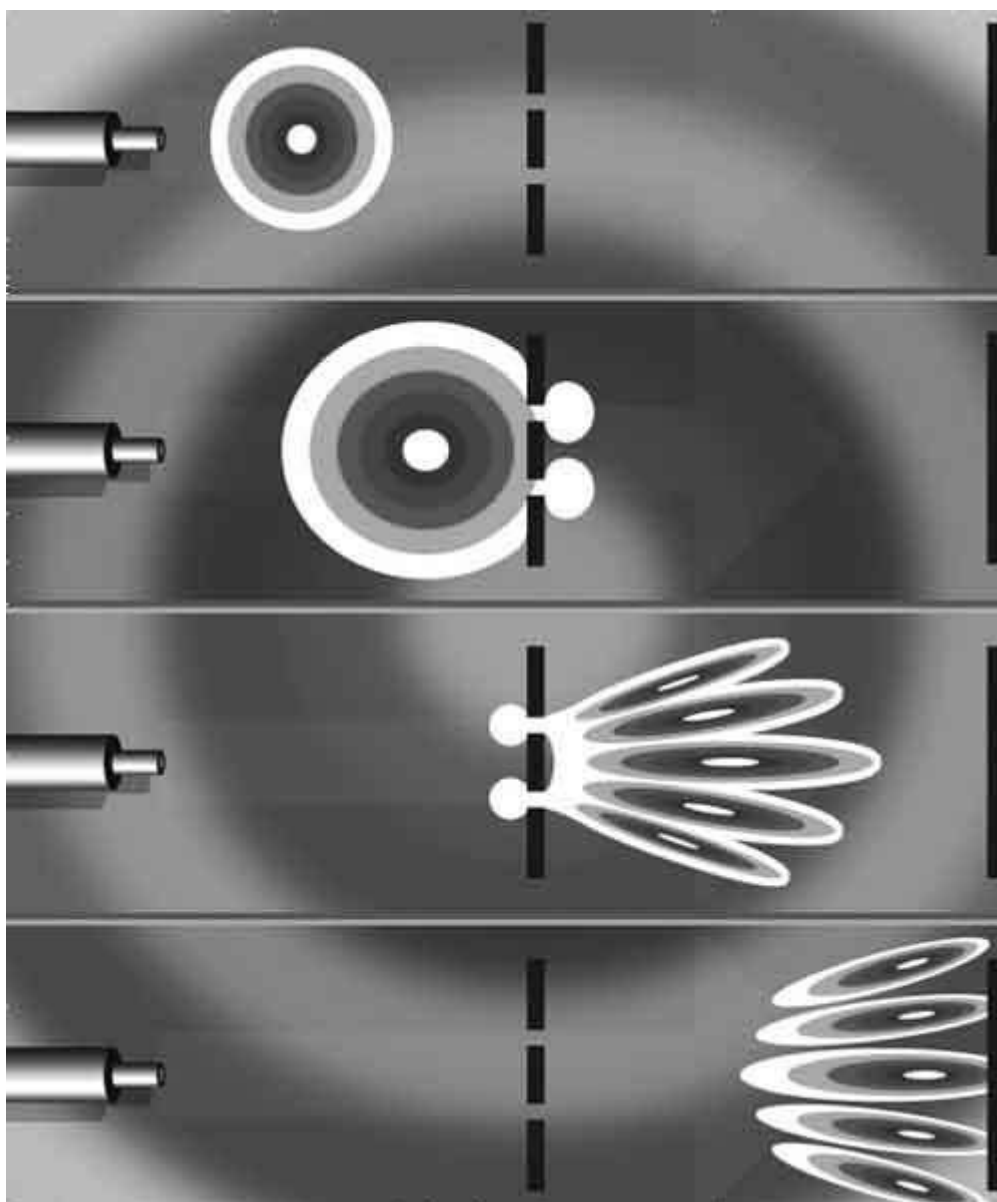
Внизу: Электрон пребывает в суперпозиции и находится в двух местах одновременно. Это означает, что, если мы будем снова и снова открывать коробку, чтобы взглянуть на электрон, описываемый волновой функцией с таким распределением, то в половине случаев электрон будет обнаруживаться в ближнем левом углу, а в другой половине случаев – в дальнем правом. Конечно же, на самом деле мы никогда не увидим один электрон в двух местах одновременно.

Но погодите-ка, а как же картина интерференции в фокусе с двумя прорезями? Она была вполне реальна и появлялась, даже когда мы пропускали сквозь прорези по одному атому! Оказывается, объяснить это мы можем именно при помощи этой идеи о суперпозиции волновых функций.

«Объяснение» фокуса с двумя прорезями

Теперь вы знаете о квантовой механике достаточно, чтобы понять, что происходит в эксперименте с двумя прорезями. Может, вам это и не нравится, но я уже упоминал, что это вполне естественная реакция, которая к тому же отражает ваш рост и свидетельствует о

постепенном принятии вами нелогичной природы обсуждаемых явлений. Заключение квантовой механики и не должны казаться вам логичными.



Как думать о фокусе с двумя прорезями с участием атомов. Когда атом вылетает из пушки, его волновая функция локализована в пространстве, но по дороге к прорезям она распространяется. Фактически контурные кривые изображают не саму волновую функцию, а вероятностное распределение, хотя визуализировать эту величину гораздо сложнее даже с математической точки зрения. Кривые здесь интерпретируются точно так же, как контурная карта гористой местности: внутренние контуры означают самую высокую вероятность обнаружения атома. Достигнув прорезей, волновая функция начинает одновременно проходить сквозь обе. По другую сторону экрана две части волновой функции формируют суперпозицию, вероятностное распределение которой выглядит существенно иначе (из-за интерференции двух частей). К тому времени как волновая функция достигает экрана, распределение становится таким, что атом с высокой вероятностью достигает одного места, не имея при этом вероятности достичь остальных. Хотя конкретный атом проявляет себя только в одном месте, статистически большое число атомов, обладающих одинаковым вероятностным распределением, в итоге составит наблюдаемую картину. Важно заметить, что на этом рисунке изображена всего лишь временная эволюция математической величины, а не физического атома. Большинство физиков утверждают, что неверно считать волновую функцию и атом отдельными физическими сущностями. Следовательно, вопрос о том, как

ведет себя атом по достижении прорезей, остается открытым. Различные решения этой проблемы мы обсудим в Главе 6.

Каждый атом, испускаемый в сторону прорезей, описывается волновой функцией, которая со временем видоизменяется. Эта волновая функция имеет вероятностную природу и сообщает нам лишь вероятное положение атома. Здесь очень важно подчеркнуть, что, хотя мы и не можем считать, что крошечный атом вдруг превращается в развернутую волновую функцию, волновая функция дает нам единственный способ отследить атом с момента его вылета из пушки до момента достижения им конкретной точки на втором экране.

По достижении прорезей волновая функция – будучи распространенной – разделяется надвое, и каждая из ее частей проходит сквозь одну из прорезей. Обратите внимание, что здесь я описываю, как изменяется математическая величина, а путем решения уравнения Шрёдингера я могу сказать, как волновая функция выглядит в каждый конкретный момент времени. Я точно не знаю, что именно происходит, и даже не могу сказать наверняка, что что-то происходит вообще, так как для проверки мне нужно установить наблюдение, а любое наблюдение изменяет итоговый результат.

Проходя сквозь обе прорези, волновая функция атома представляет собой суперпозицию двух частей, каждая из которых обладает самой большой амплитудой в соответствующей прорези. Если бы состояние атома описывалось только одной из этих частей волновой функции, мы бы сказали, что он точно прошел через соответствующую ей прорезь. Однако на самом деле суперпозиция двух частей означает, что существует равная вероятность его прохождения сквозь любую из прорезей.

По другую сторону прорезей каждая часть волновой функции снова распространяется и оба набора волн накладываются друг на друга таким образом, что по достижении экрана их совокупный эффект дает характерную полосатую картину, которую мы видим при интерференции двух настоящих волн. Только теперь мы имеем дело не с реальной волной, которая накатывает на экран, а с набором чисел, которые дают нам вероятность появления отдельной частицы в конкретном месте.

Пока частица не ударилась об экран, для описания реальности у нас есть только волновая функция. Эта волновая функция не является собственно атомом, а представляет собой лишь наше описание поведения атома в то время, пока мы за ним не наблюдаем. Она также дает нам всю информацию, которую мы можем надеяться получить о состоянии атома, если бы нам нужно было на него взглянуть. Следовательно, учитывая, что мы имеем дело лишь с тем, как выглядит волновая функция в каждый конкретный момент времени, и в соответствии с правилами используем ее, чтобы рассчитать вероятность нахождения атома в определенном месте и обладания им определенными свойствами, мы без проблем можем работать с ней. Так поступают практически все физики. Это связано с тем, что они отчаялись выяснить, что именно происходит на самом деле, используя идеи, основанные на механике Ньютона.

Вероятно, вам этого мало. В конце концов, очень легко забыть об атоме, когда мы на него не смотрим и имеем дело лишь с математикой, но факт остается фактом: крошечная локализованная частица вылетает из атомной пушки, каким-то образом на время перестает вести себя, как частица, а затем снова появляется в виде частицы на втором экране. Понять маршрут ее движения можно, только представив волну, которая проходит сквозь обе прорези одновременно. Мы можем надеяться лишь отследить продвижение атома с помощью волновой функции. Но картина интерференции, которая возникает на экране, после того как множество атомов пройдет сквозь прорези, достаточно реальна. Само собой, сквозь прорези проходит какая-то физическая волна.

Проблема здесь заключается в том, что вы хотите, чтобы я объяснил, как атом проходит сквозь обе прорези, используя образы и идеи, знакомые вам из повседневной жизни. К сожалению, это невозможно. Нравится нам это или нет, такое странное поведение представляет собой особенное свойство квантового мира, которое нам необходимо принять, как бы сложно ни было в него поверить. Это действительно происходит и, хотя мы и имеем право ожидать рационального объяснения, его еще не найдено. Многие физики утверждают следующее: мир атомов и более мелких частиц настолько далек от нашего повседневного опыта в макроскопическом мире, что мы не вправе ожидать, чтобы его можно было описать при помощи привычных нам идей. Понимаю, пользы от этого заявления мало – оно вообще похоже на отговорку. Поведение атома должно нас беспокоить. Но многие из величайших физиков полагают, что раздумывать о нем опасно и бесполезно, а потому лучше оставить это философам, которым все равно больше нечем заняться!

Некоторые физики могут раскритиковать нетехническую книгу вроде этой, поскольку акцент в ней делается на загадочности квантовой механики, а не на ее точности и применимости при объяснении множества феноменов. Что ж, всему свое время. Возвращаясь к фокусу с двумя прорезями, почему я не могу просто сказать, что атом каким-то образом ведет себя как распространенная волна, когда проходит сквозь две прорези, и покончить с этим? В конце концов, если атомы действительно ведут себя именно так, пусть так оно и будет. В ответ тем физикам, которые утверждают, что волноваться из-за квантовой механики не стоит, я хочу сказать, что они просто стали невосприимчивыми к сущности квантовой механики из-за слишком близкого знакомства с нею!

Теперь я кратко опишу устройство под названием интерферометр, которое подчеркивает идею суперпозиции (квантовой системы, которая находится в двух состояниях одновременно) в самой что ни на есть чистой и поразительной форме. Мы более не можем небрежно считать, что атом ведет себя, как физическая волна, когда мы не смотрим на него. Вместо того чтобы выпускать атомы в направлении экрана с двумя прорезями, можно по одному заставлять их проходить сквозь интерферометр^[26]. Входя в интерферометр, каждый атом должен выбрать один из двух путей, или ответвлений, следующих через аппарат своим, независимым маршрутом. Квантовая механика гласит, что, пока мы не посмотрим, волновая функция атома будет пребывать в суперпозиции двух «частей», следуя обоими маршрутами одновременно. В принципе, два пути могут быть очень далеко друг от друга, даже на противоположных концах галактики, но мы все же должны считать, что волновая функция идет по обоим. Наконец, совместив два пути, мы увидим своего рода интерференцию, которая доказывает, что атом должен был пройти одновременно по обоим путям.

Квантовые интерферометры

Интерферометры – это устройства, которые показывают, как именно одна частица может одновременно проходить по двум маршрутам, а на выходе, когда маршруты снова сходятся в одной точке, участвовать в формировании картины интерференции или другого типа сигнала, который доказывает, что нечто должно было пройти по обоим маршрутам.

Интерферометры можно использовать с фотонами, электронами и нейтронами. То, как волна, соответствующая любой из этих частиц, «расщепляется» после входа в устройство, зависит от того, какая именно перед нами частица^[27]. Например, фотоны проходят сквозь расщепители светового пучка, которые ведут себя подобно полупосеребренным зеркалам. При столкновении с таким зеркалом, установленным под углом 45 градусов к направлению движения фотона, этот фотон с вероятностью 50 процентов может пройти прямо сквозь зеркало и продолжить свой путь и с вероятностью 50 процентов может быть отражен под прямым углом к своей изначальной траектории, как это бы и произошло, если бы он достиг

двух прорезей в экране, так что он следует обоими маршрутами одновременно. Как бы ни произошло, установленные далее на пути следования фотона зеркала могут развести маршруты в стороны друг от друга, а затем снова свести их вместе.

Так как интенсивность пучка можно снизить, чтобы мы точно знали, что в каждый конкретный момент времени в интерферометре находится лишь один фотон, каждый отдельный фотон, таким образом, окажется в суперпозиции, следуя одновременно двумя независимыми путями, как герой стихотворения Роберта Фроста. Два этих ответвления интерферометра могут быть сколь угодно далеки друг от друга – на практике они могут отступать друг от друга на несколько метров. В связи с этим становится особенно сложно представить фотон в качестве волны. Его волновая функция теперь кажется действительно разделенной на две отдельных части.

Может, теперь мы вынуждены признать, что фотон прошел либо одним путем, либо другим, а не обоими сразу? Вовсе нет! Два ответвления интерферометра впоследствии сходятся и соединяются, поэтому сигнал, который выходит из устройства, представляет собой результат интерференции двух волн. Как и в фокусе с двумя прорезями, интерференция происходит из-за того, что фотону приходится пройти по двум разным маршрутам. Единственный способ объяснить наблюдаемое заключается в том, что фотон следует одновременно обоими маршрутами и на выходе интерферирует сам с собой!

Конечно же, если установить в одном из ответвлений детектор, который будет регистрировать, прошел ли фотон этим маршрутом, мы увидим его в половине случаев, а эффект интерференции пропадет, так как теперь фотон будет проходить либо одним путем, либо другим.

Иными словами, картина интерференции проявляется, когда различить два маршрута невозможно. Но если установить в одном из ответвлений устройство, которое развернет поляризацию волны фотона в этом ответвлении на 90 градусов, два маршрута дадут нам различимые фотоны и картина интерференции пропадет. Это происходит, потому что теперь при выходе фотона мы знаем, «в какую сторону» направлена его поляризация. Задержка выбора в этом эксперименте означает, что нам даже не надо включать поляризационный вращатель, пока фотон не расщепился на два компонента (посредством расщепителя пучка или полу посеребренного зеркала). Если маршруты двух фотонов изначально поляризованы вертикально, то устройство развернет поляризацию компонента в верхнем ответвлении и сделает ее горизонтальной. Так что, увидев на выходе вертикально поляризованный фотон, мы будем знать, что он прошел сквозь нижнее ответвление. С другой стороны, если фотон поляризован горизонтально, он точно прошел сквозь поляризационный вращатель в верхнем ответвлении. Означает ли это, что фотон прошел только по одному маршруту? А если да, как он мог угадать, что вращатель включится после того, как фотон разделится надвое внутри интерферометра? В конце концов, не включи мы устройство, на выходе ведь возникла бы картина интерференции!

В 1982 году физики Марлан Скалли и Кай Дрюль предложили еще более удивительное развитие этой идеи. Они предположили, что даже при наличии во включенном состоянии такого маркера «направления», как поляризационный вращатель, информация о том, по какому именно маршруту прошел фотон, в итоге может быть стерта прямо перед выходом фотона из устройства. Они предложили поставить в том месте, где пути уже соединились, «квантовый стиратель» (скажем, второе полупосеребренное зеркало). Вполне разумно предположить, что, раз два маршрута различимы на основании разного направления поляризации, интерференции не произойдет. Однако похоже, что, избавившись от улик – то есть развернув поляризацию еще на 45 градусов, благодаря чему у нас пропадает возможность понять, каким путем прошел фотон, – стиратель может восстановить картину интерференции. Это кажется невероятным: фотон, похоже, знает не только то, включен ли

вращатель в одном из ответвлений, но и то, что дальше работает квантовый стиратель, который устраняет информацию о направлении поляризации.

Несколько лет назад Юн-Го Ким с коллегами провел эксперимент по оригинальной схеме Скалли и Дрюля. Квантовый стиратель действительно восстановил картину интерференции!

Интерферометры показывают, что квантовые частицы действительно могут пребывать в суперпозиции в двух местах одновременно. Само собой, хотя я и не упоминал об этом, квантовые частицы могут пребывать и в суперпозициях других состояний, например вращаться в двух направлениях одновременно или обладать одновременно двумя и более различными энергиями или скоростями. Хотя нам легче сказать, что на самом деле в суперпозиции пребывает волновая функция, а не физическая частица, которую она описывает, что-то должно проходить по обоим ответвлениям интерферометра. Физики часто описывают эту ситуацию в противоречивых или небрежных терминах и говорят, что в интерферометре два пучка, которые интерферируют друг с другом. Но что это означает, когда мы описываем всего одну частицу? Правда в том, что никто не может удовлетворительно объяснить это нематематическим языком.

Нам известно лишь, что атом всегда описывается одной волновой функцией, а не двумя отдельными, и эта функция распространяется на оба ответвления. Именно здесь мы и заходим в тупик, представляя волновые функции классическими волнами. Если звуковая волна расщепляется и следует двумя разными маршрутами, которые в конце снова сходятся вместе, на выходе мы будем наблюдать эффект интерференции (незначительно изменяя частоту одной из волн, мы сможем услышать «пульсацию», так как две волны в итоге не будут совпадать по фазе). Однако звуковая волна в этом примере физически расщепляется надвое. Если два ответвления, по которым пойдут звуковые волны, приведут в различные места, звук услышит каждый из двух наблюдателей. В случае с атомом не стоит забывать, что только один наблюдатель увидит конкретный атом, если будет его искать. Строго говоря, мы утверждаем, что атом обладает единственной волновой функцией с двумя частями, которые описывают, как он следует по каждому из ответвлений, как бы далеко друг от друга они ни отстояли. Волновая функция распространяется на все пространство и принимает нулевое значение везде, кроме пространства внутри двух ответвлений. Следовательно, если установлено наблюдение, вся распространенная волновая функция схлопывается в единственную настоящую частицу, проходящую либо по одному из ответвлений, либо по другому.

Нелокальность

Все мы слышали не имеющие надежных свидетельств, но при этом интригующие заявления о том, что идентичные близнецы могут чувствовать эмоциональное состояние друг друга, даже если их разделяют большие расстояния. Утверждается, что близнецы каким-то образом связаны на психическом уровне, который науке еще только предстоит объяснить. Подобным образом пытаются объяснить и как собака чувствует, когда ее хозяин идет домой, и как должны работать черномагические куклы вуду. Стоит подчеркнуть, что я не утверждаю, будто эти примеры имеют хоть какое-то отношение к квантовой механике, и даже не верю, что они действительно происходят. Я упоминаю их исключительно в качестве дурацких примеров феномена под названием нелокальность. Интересно, что существование нелокальности в квантовом мире неопровержимо доказано: она проявляется посредством эффекта, именуемого запутанностью.

Представьте игральные кости. Какова вероятность, что выпадет дубль? Математические расчеты вполне очевидны. Для каждого значения одной кости существует один из шести шансов на то, что значение второй окажется таким же. Следовательно, вероятность двух дублей подряд составляет один к тридцати шести (так как $1/6 \times 1/6 = 1/36$). Конечно, это не

означает, что, если вы бросите кости тридцать шесть раз, два дубля подряд выпадут только однажды; это означает лишь, что «в среднем» вероятность их выпадения именно такова^[28]. Путем перемножения дробей мы получаем, что вероятность выбросить дубль десять раз подряд составляет примерно один к шестидесяти миллионам! А это значит, что, если бы каждый гражданин Британии бросил кости десять раз подряд, то статистически десять дублей выпало бы только у одного из них.

Что, если я дам вам кости, которые всегда падают дублями? Может, сначала выпадет дубль-шесть, затем дубль-два и так далее: число выпадает случайно, но при этом кости синхронизированы между собой. Вы по праву удивитесь и попытаетесь понять, в чем тут фокус. Возможно, в них встроен какой-то механизм, который контролирует, как именно они падают, и обе кости заранее запрограммированы приземляться в одной и той же последовательности номеров. Это можно легко проверить, бросив только одну кость, а вторую при этом зажав в кулаке. Теперь они рассинхронизируются и фокус не сработает.

Если же они продолжают выпадать дублями, несмотря на это, то объяснить это можно лишь тем, что они, видимо, каким-то образом восстанавливают синхронность перед каждым броском, обмениваясь дистанционным сигналом. Однако такой обмен сигналами требует важной оговорки: если кости находятся очень далеко друг от друга (скажем, одна из них на Земле, а другая – на Плутоне), их необходимо бросать в соответствии с составленным заранее расписанием, чтобы они не успели передать друг другу никакой сигнал.

Само собой, если бросить кости всего один раз и впоследствии подтвердить, что они упали одинаково, все это можно списать лишь на счастливый случай. Но повторяя процесс на Земле и на Плутоне снова и снова, скажем, раз в минуту, и обнаруживая, что кости всегда ложатся одинаково, мы придем к мысли о какой-то мгновенной связи. Естественно, мы можем убедиться, что они не синхронизируются перед броском, точно так же, как мы выясняли, что они не запрограммированы идентичным образом. Для этого мы произвольное число раз бросаем ту кость, которая находится на Земле, в последнюю минуту перед началом эксперимента.

Свет с Земли достигает Плутона за несколько часов, так что перед каждым броском кости не могут связываться друг с другом посредством какого бы то ни было известного нам физического сигнала. Если же они все равно ложатся одинаково, нам приходится признать, что они взаимодействуют на скорости, которая выше скорости света, а существование такой скорости запрещается всеми известными нам физическими законами.

В специальной теории относительности Эйнштейн доказал, что ни одно тело и ни один сигнал не может двигаться быстрее скорости света. Представьте его недоверие, когда выяснилось, что квантовые частицы действительно могут взаимодействовать друг с другом описанным образом^[29].

Описанное выше поведение костей представляет собой пример того, что технически называется нелокальной связью. Под этим я понимаю, что происходящее здесь мгновенно влияет на происходящее где-то там. Без этого не обойтись, если кости снова и снова демонстрируют знание о том, как выпадет другая, хотя для передачи между ними какого-либо сигнала времени недостаточно. В классической механике это невозможно. Идея причины и следствия не только подразумевает, что причины всегда опережают следствия, но и подчиняется одному строгому условию. Одним из самых важных уроков, которые мы извлекли из теории относительности Эйнштейна, является то, что, если два события, одно из которых представляет собой причину другого, разделены некоторым расстоянием, они должны быть разделены и временем в связи с существованием барьера скорости света. Следовательно, если кому-то суждено пострадать в дорожной аварии, в соответствии с законами классической физики его идентичный близнец, находящийся в тысяче километров

от него, не может (какое бы физическое сообщение ни было послано) узнать об этом быстрее, чем свет пройдет расстояние между ними – всего за несколько тысячных секунды.

Физики уже не сомневаются, что мгновенная коммуникация между далекими объектами, или нелокальность, является характерной чертой квантового мира и может быть связана с природой самой волновой функции. Большинство физиков не слишком переживает об этом, так как квантовая нелокальность не может использоваться для передачи сигнала на скорости выше скорости света – в нарушение теории относительности – из-за свойственной квантовому миру вероятностной природы.

Нам не нужно обращаться к гипотетическому примеру двух волшебных костей, чтобы продемонстрировать нелокальность в действии. Она характерна для уже знакомой нам расщепленной волновой функции в двух ответвлениях интерферометра. Если два ответвления устройства находятся на расстоянии нескольких световых лет друг от друга, мы все же можем включить детектор, после того как атом вошел в интерферометр, чтобы проверить, находится ли он в одном из ответвлений^[30]. Если мы обнаружим атом, той части волновой функции, которая следует по другому ответвлению, тотчас придется принять нулевое значение, так как нет никакой вероятности, что атом выбрал этот маршрут.

Описанное выше свойство нелокального коллапса частей распространенных волновых функций при наблюдении за происходящим в других обстоятельствах называется просто – коллапс волновой функции.

Мне стоит заметить, что мой пример с костями существенно отличается от того, что на самом деле происходит в квантовой механике. Если бы кости действительно были связаны на квантовомеханическом уровне, то, бросая одну из них, как я и предлагал, чтобы исключить вероятность предварительной настройки, мы неизбежно будем изменять результат бросания другой.

Запутанность

Пока что в этой главе я разбирал две разные и довольно сложные идеи – суперпозицию и нелокальность. Первая утверждает, что квантовая частица может пребывать в комбинации двух и более состояний одновременно, а вторая гласит, что две квантовые частицы (или две отдельные части распространенной волновой функции одной частицы) могут каким-то образом оставаться в контакте, как бы далеко друг от друга они ни находились. Теперь я совмещу эти идеи, чтобы ввести третью квантовую концепцию.

В квантовой механике идея о том, что кости остаются в (нелокальном) контакте, как бы далеко друг от друга они ни находились, известна под названием запутанность. Хотя этот термин на заре квантовой механики использовал еще Шрёдингер, на первый план идея вышла лишь в последние годы.

Если две квантовых частицы взаимодействуют друг с другом, они могут стать взаимосвязанными – и тогда их судьбы переплетутся навсегда, как бы далеко друг от друга они ни улетели, пока одна из них не вступит во взаимодействие с измерительным прибором. Математически это проявляется следующим образом: частицы описываются единой волновой функцией, которая содержит в себе объединенную и общую информацию об их квантовых состояниях. Теперь одна из частиц может оказаться в суперпозиции, например встретив на пути экран с двумя прорезями. Если это происходит, вторая частица тоже волея-неволей оказывается в суперпозиции различных состояний, которые зависят от (а точнее, коррелируют с) каждой из двух альтернатив первой частицы. Теперь считается, что волновая функция описывает «запутанное состояние».

Самый известный пример этого был впервые описан в статье, которую Эйнштейн написал вместе с двумя коллегами, Борисом Подольским и Натаном Розеном. Само собой, в то время Эйнштейна гораздо больше волновала идея неопределенности, в соответствии с которой квантовая механика настаивает, что мы не можем одновременно знать все о квантовой частице. Однако мы увидим, что на самом деле внимание стоило обратить на нелокальный характер запутанности.

Эксперимент ЭПР

В 1935 году, вскоре после того как Эйнштейн переехал из Германии в Соединенные Штаты, он решил провести мысленный эксперимент, чтобы подчеркнуть, что в квантовой механике невозможно полагать, будто частица имеет определенную позицию, пока мы на нее не смотрим. Вместе с Подольским и Розеном он разработал сценарий, который получил название ЭПР-парадокса по инициалам троих авторов соответствующей статьи. Они взяли две частицы, такие как фотоны, которые одновременно испускаются одним источником и движутся в разные стороны с одинаковой и противоположно направленной скоростью.

Мы уже знаем, что, если следить только за одним из фотонов, его необходимо считать распространенной волной, пока он не обнаружен. Нам приходится признать это, потому что мы понимаем, что если он наткнется на экран с двумя прорезями, то его дальнейший маршрут будет продиктован картиной интерференции его волновой функции. (Не забываяте, картину интерференции мы увидим, только когда сквозь прорези пройдет множество идентичных фотонов.) Каждый из них ведет себя, как волна, пока он не обнаружен, и как частица, когда он обнаружен. Эйнштейн с коллегами заметил, что интерес представляет другой фотон. Если мы решим измерить волнообразные свойства первого фотона, например длину его волны, это будет равносильно измерению его импульса^[31]. А так как два фотона обладают одинаковой величиной импульса, но при этом движутся в противоположных направлениях, мы также узнаем точную величину импульса второго фотона и сможем сопоставить ее с точной длиной волны. Это все равно что сказать, что он тоже ведет себя, как волна.

Однако – и здесь начинается самое интересное, – если бы мы вместо этого решили измерить точное положение первого фотона, то он предстал бы перед нами локализованной частицей. После этого мы смогли бы определить и точное положение второго фотона в этот момент, даже не наблюдая за ним, поскольку он прошел бы точно такое же расстояние от источника, двигаясь в противоположную сторону. Таким образом, напрашивается вывод, что атрибуты, которыми мы наделяем первый фотон, зависят от того, что мы решаем с ним сделать и как это измерить. В конце концов, мы знаем, что, определяя его положение, мы должны оказывать влияние на его волновую функцию, как это видно в фокусе с двумя прорезями. Но второй фотон мы при этом не затрагиваем. Мы могли бы специально подождать, пока они разлетятся на очень большое расстояние, чтобы точно никак не повлиять на второй фотон. Вывод состоит в том, что мы, в принципе, могли бы узнать точное положение второго фотона (как частицы) или точную величину его импульса (как волны) в любой момент времени, не наблюдая за ним. Неважно, что на практике это невозможно, поскольку нам в таком случае придется одновременно провести два разных измерения для первого фотона. Важно же то, что второй фотон должен был всегда обладать определенным положением и величиной импульса.

Я вернусь к этой проблеме в Главе 6, где буду рассматривать настойчивость Эйнштейна в отношении так называемой «объективной реальности», то есть того, что мы не должны ждать измерения конкретной характеристики квантовой системы, чтобы эта характеристика стала реальной. Сегодня уже известно, что насчет этого он ошибался (см. на стр. 109). Большинство физиков утверждает, что ни одна частица не обладает ни определенным положением, ни определенной величиной импульса, пока не проведены измерения. Хотя

возможен и другой взгляд на эту проблему, не приходится и сомневаться, что здесь точно задействована какая-то нелокальная коммуникация, посредством которой потревоженная частица мгновенно узнает о том, какое именно измерение было проведено в отношении ее партнера.

Вот «решение» этого парадокса: так как частицы вступили во взаимодействие, в дальнейшем они описываются запутанной волновой функцией, а их судьбы связаны, как бы далеко друг от друга они ни разлетелись. При измерении какого-либо свойства одной из них происходит коллапс полной волновой функции и второй фотон моментально наделяется соответствующим свойством. Все просто, правда?

Сегодня квантовая нелокальность и запутанность уже не вызывают философских споров. Они считаются ключевыми характеристиками квантового мира. На самом деле запутанность многих частиц может привести к разработке совершенно новой технологии, о которой и не мечтали квантовые пионеры.

Квантовый похититель драгоценностей

Существует множество примеров использования квантовой странности, но ни один из них не может сравниться в замысловатости с идеей бесконтактных измерений. Описанный ниже выдуманный сценарий представляет собой вариацию концепции, известной как эксперимент Элицура – Вайдмана с тестированием бомб, которая уже была проверена в лабораторных условиях.

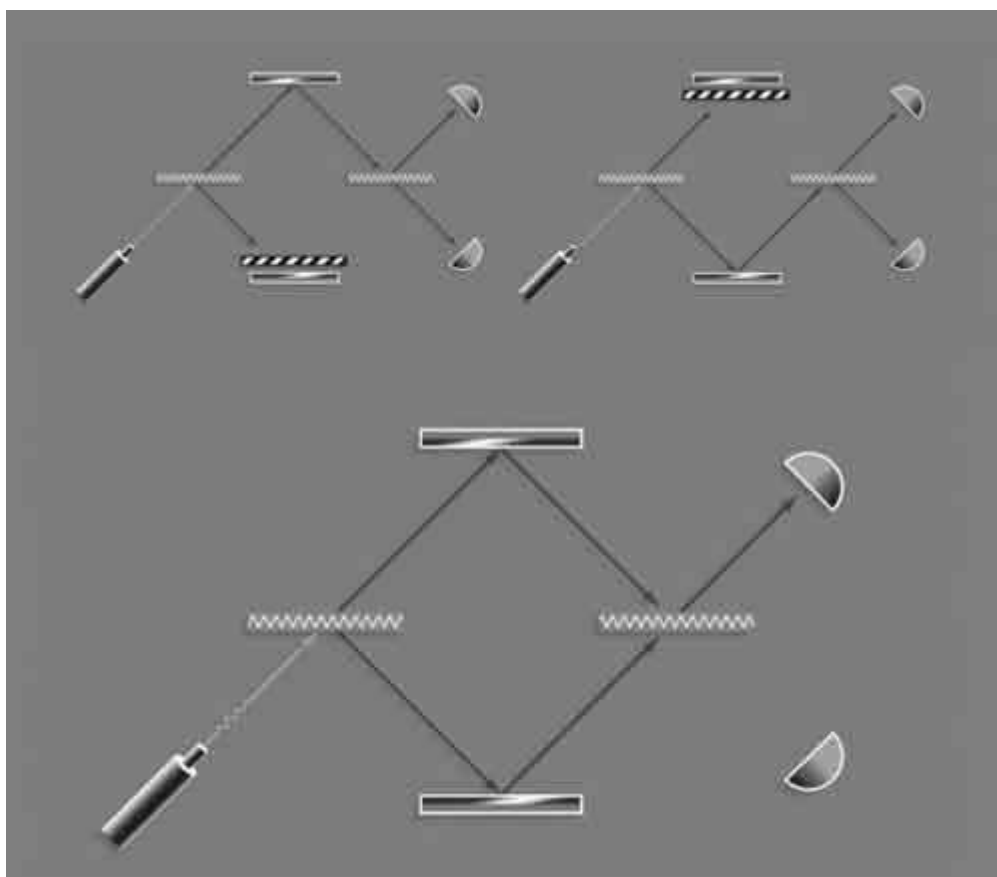
Международный похититель драгоценностей планирует крупную кражу. В хранилище снабженного передовой системой безопасности швейцарского банка находится несколько бесценных бриллиантов. Проникнуть в хранилище весьма непросто, но для нашего хитрого вора эта задача вполне выполнима. Однако, оказавшись внутри, он сталкивается с неразрешимой проблемой. Не касаясь ни одного из бриллиантов, он может провести в хранилище несколько часов. Если же он возьмет хотя бы один из них, у него останется всего 30 секунд, чтобы завершить начатое и выйти через дверь обратно, пока он не оказался запертым внутри. Так как на вытаскивание одного бриллианта необходимо 20 секунд, он может украсть только один камень. Проблема в том, что банк надежно защитил бриллианты и разместил их среди сотни фальшивок, которые на вид неотличимы от настоящих камней. Поскольку вор может взять только один из них, выбирать ему нужно внимательно. Выяснить, какие камни настоящие, можно только одним способом – посветив на них особым синим светом: фальшивки будут отражать этот свет, а подлинные бриллианты – поглощать его.

Но банк не остановился и на этом. Если настоящий бриллиант поглотит хотя бы один фотон синего света, он тут же будет уничтожен. Похоже, с точки зрения владельцев банка, лучше, чтобы бриллианты не достались никому, чем чтобы они попали не в те руки. Конечно же, в банке знают, какие из бриллиантов настоящие, поэтому необходимости светить на них синим светом не возникает.

Казалось бы, в такой ситуации у вора нет возможности преуспеть. Те камни, которые будут отражать особый синий свет, испускаемый фонариком, купленным в магазине для похитителей бриллиантов, представляют собой фальшивки, поэтому на них не стоит обращать внимания. Но проверить, выбрал ли он подлинный камень, не разрушив его, наш вор тоже не может. Шансы на то, чтобы взять нужный камень наугад, как известно вору, составляют примерно один к десяти.

Здесь и находит применение хитроумный фокус под названием квантово-невозмущающий тест. Похитителю бриллиантов нужно лишь особое устройство, которое называется

интерферометром Маха – Цендера (см. рисунок). Сперва я опишу принцип действия этого устройства.



Интерферометр Маха – Цендера состоит из источника фотонов, который испускает по одному фотону зараз, двух полупосеребренных зеркал, чтобы расщеплять и снова сводить воедино пучок, двух полностью отражающих зеркал и двух детекторов фотонов.

Вверху: Если любое из двух отражающих зеркал заблокировано, остается только один путь (по которому фотон проходит в половине случаев), а второе полупосеребренное зеркало обеспечивает равную вероятность достижения фотоном одного из двух детекторов.

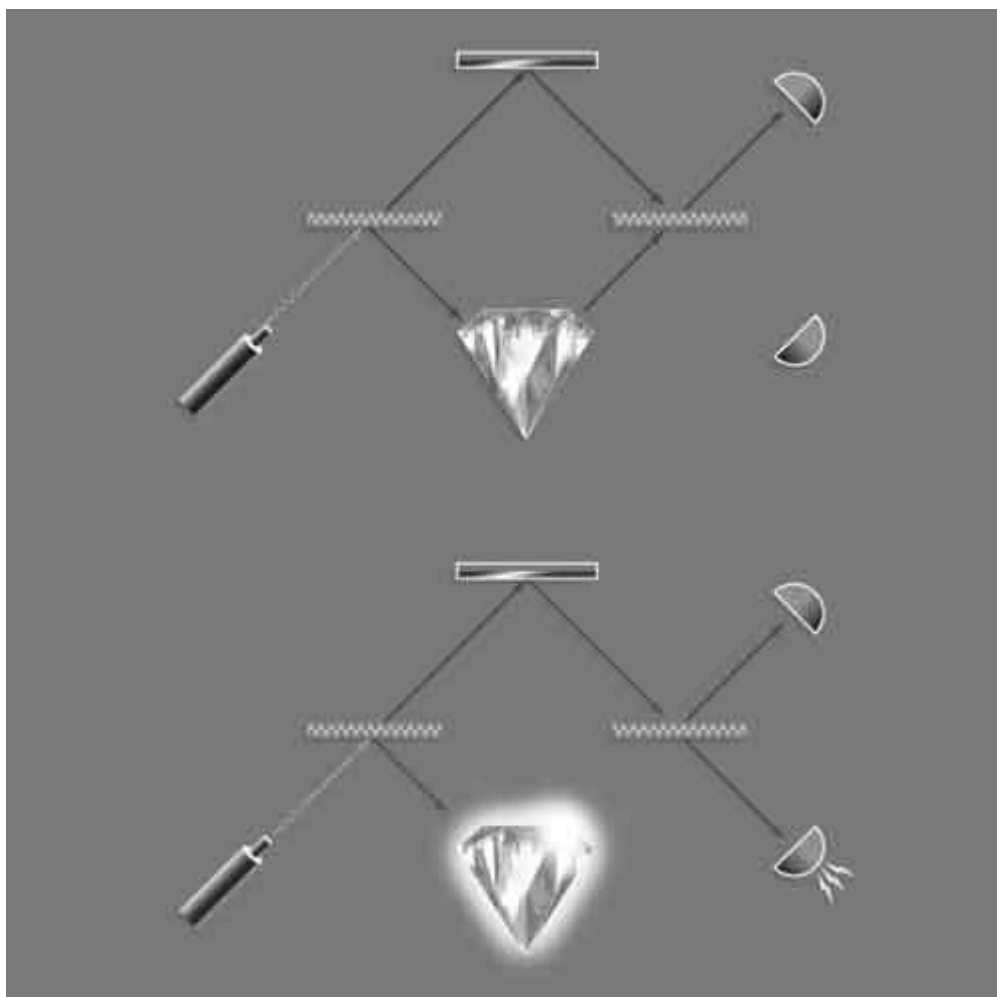
Внизу: Когда оба зеркала отражают, два пути можно поправить таким образом, чтобы в результате их интерференции во втором полупосеребренном зеркале фотон попадал лишь в верхний детектор.

Когда фотон влетает в интерферометр, он встречает на пути полупосеребренное зеркало, которое выполняет роль «расщепителя пучка» и разделяет волну фотона на два компонента, один из которых проходит сквозь зеркало, а другой отражается. Оба компонента далее отражаются от зеркал и снова встречаются во втором полупосеребренном зеркале. Если два промежуточных зеркала расположены аккуратно, интерференция двух путей может быть настроена так, чтобы фотон всегда уходил в одном направлении. Конечно, если поставить детектор рядом с одним из срединных (полностью отражающих) зеркал, чтобы видеть, в каком направлении улетает фотон, то квантовая интерференция, как и в случае с фокусом с двумя прорезями, разрушается. Теперь каждый фотон проходит не по обоим путям одновременно, а либо по одному из них, либо по другому. В половине случаев второе полупосеребренное зеркало обеспечит вылет фотона из устройства в том же направлении, в котором он вылетел бы, если бы не было никаких измерений. Однако в другой половине случаев фотоны будут вылетать в другом направлении и регистрироваться внешним

детектором. Итак, в отсутствие измерений детектор не регистрирует ни одного фотона, но если за одним из зеркал будет установлено наблюдение, то детектор регистрирует половину фотонов, так как не будет разрушительной интерференции, которая сможет помешать фотонам вылетать в этом направлении.

В устройстве похитителя драгоценностей вместо нижнего зеркала используется бриллиант. Если бриллиант фальшивый, то он отражает свет, поэтому нижний детектор не реагирует. Однако, если бриллиант подлинный, он выступает в качестве измерительного прибора. В половине случаев фотон достигает бриллианта и поглощается им, в результате чего бриллиант разрушается. Но это неважно. В другой половине случаев фотон следует по иному маршруту. Здесь он сталкивается с выбором возле второго полупосеребренного зеркала, где он либо отражается вверх (прочь от нижнего детектора), либо проходит сквозь зеркало и заставляет детектор среагировать. Таким образом, при проверке каждого настоящего бриллианта детектор будет реагировать в четверти случаев. Это означает, что проверке подвергается подлинный камень, но при этом он не разрушается, так как фотон не измеряется при следовании поэтому пути! Обратите внимание на эту тонкость. Фальшивый бриллиант не дает измерений, поскольку мы не получаем от него информацию, «в какую сторону» летит фотон.

Как только вор услышит писк детектора, он должен вытащить соответствующий бриллиант и сбежать из хранилища. Он провел квантовое измерение, даже не прикоснувшись к измеряемому объекту. Может, в Голливуде заинтересуются подобным сценарием? Я бы с радостью сыграл квантового физика – похитителя бриллиантов. Само собой, в компании Брэда Питта и Джорджа Клуни.



Теперь вместо нижнего зеркала интерферометра используется бриллиант.

Вверху: Фальшивый бриллиант отражает свет, как бы это сделало обычное зеркало. Два пути интерферируют друг с другом, поэтому нижний детектор не регистрирует ни одного фотона.

Внизу: Настоящий бриллиант поглощает фотон и разрушается. Однако это равносильно проведению измерения, так как теперь мы знаем, по какому маршруту пошел фотон, а в половине случаев с подлинным бриллиантом на месте зеркала фотон будет выбирать другой путь, избегая встречи с бриллиантом. Так как интерференции в таких условиях не возникает, нижний детектор время от времени регистрирует фотоны. Когда это происходит, мы понимаем, что перед нами подлинный бриллиант, хотя ни один фотон к нему и близко не подходит!

ЭПР-парадокс и теорема Белла

В своей оригинальной форме эксперимент Эйнштейна – Подольского – Розена должен был показать, что квантовая механика дает неполное описание реальности, а все ее странности объясняются тем, что мы не до конца понимаем устройство субатомного мира. Если поставить это в исторический контекст, аргументы, представленные в статье ЭПР, были частью длительного спора, развернувшегося в 1920 – 1930-е годы между двумя гигантами физики XX века Эйнштейном и Бором. В то время, конечно, их разногласия носили лишь философский характер, так как никто не знал, как осуществить подобный эксперимент на практике.

Затем в 1964 году ирландский физик Джон Белл предложил способ раз и навсегда выяснить, кто был прав. Теорема Белла, или неравенство Белла, как его иногда называют, стала важным шагом в медленном продвижении к полному пониманию квантовой механики. Многие действительно считают ее самым важным научным открытием XX века. Целый ряд научно-популярных книг о квантовой механике подробно описывает ее в простых, нематематических терминах. Но правда в том, что теорему Белла не описать парой слов – читателю-неспециалисту все равно придется поломать над ней голову.

Однако я все же очерчу основные принципы. Эйнштейн утверждал, что причину, по которой две частицы в ЭПР-эксперименте обладают взаимосвязанными характеристиками, сложно назвать удивительной. В конце концов, в прошлом они пребывали в контакте (так как были испущены из одного источника). Если их характеристики заданы изначально, им нет никакой нужды передавать друг другу сигналы на скорости выше скорости света. Эти заранее заданные характеристики, которые квантовая механика не описывает в отсутствие измерений, называются «скрытыми параметрами» и не требуют никакой нелокальности, вполне объяснимо тревожившей Эйнштейна. Но был ли Эйнштейн прав? Могут ли эти скрытые параметры объяснить квантовую странность?

Теорема Белла перенесла спор о природе квантовой реальности из области философии в сферу экспериментальной физики^[32]. Белл вывел формулу, которая показала, что если Эйнштейн прав, то корреляция двух частиц должна быть максимальной. Иными словами, раз частицы не могут заранее знать, какие именно измерения будут проводиться в отношении каждой из них, возможности их тайной подготовки ограничены. Следовательно, даже при условии существования скрытых параметров, которые задают характеристики обеих частиц, синхронизация результатов измерений этих частиц не безгранична. Однако если квантовая механика и идея об одной волновой функции, описывающей запутанное состояние пары, верны, то корреляция, или взаимодействие, будет более сильной, чем этот максимум – в нарушение неравенства Белла.

Не буду вдаваться в подробности и описывать, какой именно эксперимент нужно провести, чтобы проверить неравенство Белла, – не потому, что это слишком сложно, а потому, что анализ полученных данных и вывод поразительных следствий займет не одну страницу. Тем не менее опыт довольно очевиден и уже не раз был описан в подробностях в других источниках.

В 1982 году в Париже команда физиков под руководством Алена Аспе наконец сумела провести ЭПР-эксперимент и проверить теорему Белла. Они использовали два фотона, испускаемые атомом кальция, которые находились во взаимосвязи по направлению поляризации (под прямым углом друг к другу). Их результаты убедили большинство физиков, что неравенство Белла нарушается, а следовательно, квантовая механика при всей своей странности на самом деле представляет собой принцип поведения природы. Будь Эйнштейн еще жив, он бы, без сомнения, наконец признал поражение. Квантовая механика действительно нелокальна или, как говорил Эйнштейн, задействует «причудливое действие на расстоянии».

Многие физики, конечно, предпочли бы не говорить об этой нелокальности. Они сказали бы, что она необходима, если мы хотим найти физический механизм, объясняющий экспериментальные результаты. По их мнению, мы можем лишь утверждать, что измерения, проводимые в отношении каждой частицы, открывают некоторый аспект природы этой частицы, который прежде был неизвестен. На основании этих измерений мы не можем выяснить, какими характеристиками частица обладала до проведения измерений, более того, этим характеристикам даже не были присущи определенные величины, поскольку они пребывали в суперпозиции всех возможных вариантов, ожидая, пока измерение заставит частицу определиться, а следовательно, посредством запутанности, определится и ее далекий партнер! Однако, несмотря на столь прагматичные заявления, нелокальность никуда не пропадает – многие просто предпочитают низводить ее до уровня абстрактной математики, отрицая существование физической мгновенной связи между частицами. Этот взгляд лучше всего изложил работающий в Корнеллском университете физик Дэвид Мермин:

«Полагаю, справедливо сказать, что большинство физиков не беспокоится по поводу [экспериментального подтверждения нарушения неравенства Белла]. Меньшинство же считает, что это происходит, поскольку большинство просто отказывается думать об этой проблеме, однако, учитывая, что за полвека, которые прошли с момента опубликования статьи Эйнштейна, Подольского и Розена, из этой головоломки так ничего и не выросло, винить их довольно сложно. Загадка [ЭПР-эксперимента] заключается в том, что он дает нам набор корреляций, для которых нет никакого объяснения. Большинство, скорее всего, будет отрицать даже это, утверждая, что квантовая теория дает необходимое объяснение. Это объяснение, однако, есть не что иное, как рецепт вычисления корреляций. Этот вычислительный алгоритм так красив и так действенен, что он может сам по себе приобрести убедительный характер полного объяснения».

Квантовая хаология

Сэр Майкл Берри, Профессор Королевского общества, Бристольский университет

Казалось бы, квантовый мир существенно отличается от мира классической физики, который он отвергает. Квантовые энергетические уровни, волновые функции и вероятности кажутся несовместимыми с ньютоновскими частицами, движущимися по определенным орбитам. И все же две теории должны быть тесно связаны. Даже Луну можно считать квантовой частицей, так что должны быть обстоятельства – грубо говоря, большие, тяжелые объекты, – для которых квантовые и классические

предсказания совпадают. Но «границы применимости классической теории» размыты, и существенное число современных исследований нацелено на то, чтобы их понять.

Сложности с границами применимости классической теории становятся особенно большими, когда ньютоновские орбиты хаотичны. Хаос – это длительная нестабильность, в которой движение, хотя и является четко определенным, столь чувствительно, что его предсказание на практике невозможно. В хаосе нет регулярных повторений. Знакомый всем пример – погода. Еще один – беспорядочное вращение одного из спутников Сатурна, Гипериона, огромной каменной картофелины размером с Нью-Йорк.

Хаос представляет собой проблему, так как разворачивание квантовой волны во времени определяется соответствующими уровнями энергии. Математическим следствием существования энергетических уровней является тот факт, что квантовое развитие времени включает в себя лишь периодическое движение на определенной частоте – то есть противоположность хаосу. Следовательно, в квантовой механике нет хаоса, одна регулярность. Как же тогда может существовать хаос в нашем мире?

На этот вопрос два ответа. Первый заключается в том, что по достижении границ применимости классической теории – когда тела становятся больше и тяжелее – время, необходимое на подавление хаоса квантовой механикой, тоже становится больше и, строго говоря, стремится к бесконечности. Однако это объяснение не годится, так как «время подавления хаоса» часто бывает на удивление кратким – даже для Гипериона оно составляет всего несколько десятилетий, что в астрономических масштабах весьма немного.

Истинная причина существования хаоса заключается в том, что большие квантовые системы сложно изолировать от окружения. Даже «поток фотонов» с Солнца (вторичное излучение которого дает свет, благодаря чему мы видим Гиперион) разрушает деликатную интерференцию, лежащую в основе квантовой регулярности. Большие квантовые системы очень чувствительны к неконтролируемым внешним воздействиям – этот эффект называется декогеренцией. В границах применимости классической теории квантовое подавление хаоса само по себе подавляется декогеренцией, в результате чего хаос появляется снова в качестве знакомой черты крупномасштабного мира.

Квантовые системы меньшего размера, такие как атомы в сильных магнитных полях, сильно вибрирующие молекулы или заключенные в «квантовые точки» с несимметричными границами электроны, можно успешно изолировать от окружения. Следовательно, декогеренция в них не возникает, а потому не существует и квантового хаоса, хотя соответствующие им классические системы хаотичны. Тем не менее эти квантовые системы целым рядом способов отражают классический хаос, изучением чего и занимается квантовая хаология.

Энергетические уровни сильно возбужденных состояний формируют набор чисел, которые можно изучить статистически. Эта статистика (например, вероятность, определяющая расстояние между соседними уровнями) различна в условиях хаоса и в условиях регулярности. Точно так же различен и рисунок, описывающий состояния квантовых волн. Удивительным и даже загадочным открытием стало то, что расположение энергетических уровней в квантовой хаологии связано с одной из глубочайших проблем математики и свойствами простых чисел.

Глава 5. Наблюдатели и наблюдаемое

Основы квантовой механики, которые я уже описал, могли показаться вам непонятными, а порой и притянутыми за уши, но факт остается фактом: и с математической, и с логической точки зрения квантовые законы однозначны и четко определены. Хотя даже многие квантовые физики сталкиваются с неудобствами при переводе странных, абстрактных

свойств волновой функции на язык реального мира, математический аппарат и формализм квантовой механики слишком успешны и слишком точны, чтобы сомневаться в том, что она отражает фундаментальные истины. Однако остается последняя загадка, которую квантовые физики не могут объяснить удовлетворительным образом. Многие скажут, что это самый важный и при этом самый загадочный аспект этой науки, а именно: почему, установив наблюдение, мы не можем увидеть волновую функцию – или ту физическую реальность, которую она описывает, – в действии? Или, иными словами, почему картина интерференции исчезает, когда мы пытаемся проверить, сквозь какую из прорезей прошел атом? Квантовая механика не дает ответа на эти вопросы, и они составляют основу так называемой проблемы измерения в квантовой механике. Мы повсюду видим эффекты влияния волновой функции – с ее вероятностной природой, нелокальностью и способностью к формированию суперпозиций и запутанных состояний. На самом деле эти свойства необходимы нам, чтобы объяснить плотность материи, сияние Солнца, даже возникновение атомов, из которых состоят наши тела. Но проблема никуда не пропадает: как мы понимаем, как именно распространенная волновая функция вдруг преобразуется в локализованную частицу, стоит нам попытаться установить за ней наблюдение?

Квантовые физики называют этот загадочный процесс «коллапсом волновой функции» – в предыдущей главе я и сам использовал эту фразу. Однако относительно недавнее открытие убедило многих физиков, что в такой терминологии нет необходимости. Впрочем, пока что никто не знает наверняка, решена ли проблема измерения или нет.

Я начну с описания того, что мы имеем в виду под «наблюдением».

Что видишь, то и получишь

В нашем обычном мире макроскопических объектов я принимаю на веру, что любой объект является именно тем, чем он мне кажется. Естественно, я подразумеваю при этом, что могу доверять собственным глазам и не нахожусь под действием галлюциногенных препаратов, а освещение вполне достаточно. Действительно, чтобы я увидел какой-либо объект, этот объект должен либо испускать свет, либо – что более вероятно – отражать его, чтобы он попал мне в глаза. Затем изображение, которое формируется у меня на сетчатке, интерпретируется моим мозгом.

Но вам не приходило в голову, что посредством отражения света от объекта мы возмущаем этот объект и тем самым едва заметно изменяем его, к примеру, нагревая его на крошечную долю градуса или заставляя его чуть отступить от своего изначального положения? Само собой, когда я смотрю на стол или на машину – или даже на клетку под микроскопом, – столкновение фотонов света не дает никакого эффекта, который мне под силу измерить. Однако, когда мы имеем дело с квантовыми объектами, которые сами сравнимы по размерам с фотонами, все совершенно иначе. Вспомните школьную физику и третий закон Ньютона: любому действию есть равное и противоположное противодействие. Чтобы «увидеть» электрон, нам нужно, чтобы от него отразился фотон. Но когда мы засечем этот фотон, электрон уже не будет в том месте, где он был бы, не случись столкновение.

Это неизбежное возмущение квантовой частицы при наблюдении часто используется для описания проблемы измерения в квантовой физике и даже легло в основу принципа неопределенности Гейзенберга. Здесь мы имеем дело не только с чрезмерным упрощением, но и с ошибочным суждением, так как перед нами тотчас возникает картина классических шариков, отталкивающихся друг от друга. Хотя эта картина очень важна для доказательства корпускулярной природы света, как мы видели в Главе 2, когда я описывал фотоэлектрический эффект и эксперименты Комптона с рассеянием, в которых он применял фотоны рентгеновских лучей и электроны, она ничего не сообщает нам об истинной квантовой природе фотонов и электронов.

Тем не менее возмущение объекта посредством измерения какого-либо его параметра понять несложно. Вот еще один простой пример. Я определяю температуру воды в ванной, используя термометр. Сначала некоторое количество тепла перейдет на термометр, чтобы он нагрелся до температуры воды, однако эта крошечная потеря тепла вряд ли повлияет на температуру воды (в конце концов, она теряет гораздо больше тепла, нагревая окружающий воздух, чем термометр). Но при измерении температуры воды в маленькой пробирке посредством погружения туда термометра произойдет относительно большой теплообмен, если только термометр заранее не нагрет до температуры воды. Следовательно, после погружения термометра в воду мы не сможем выяснить ее точную температуру до этого.

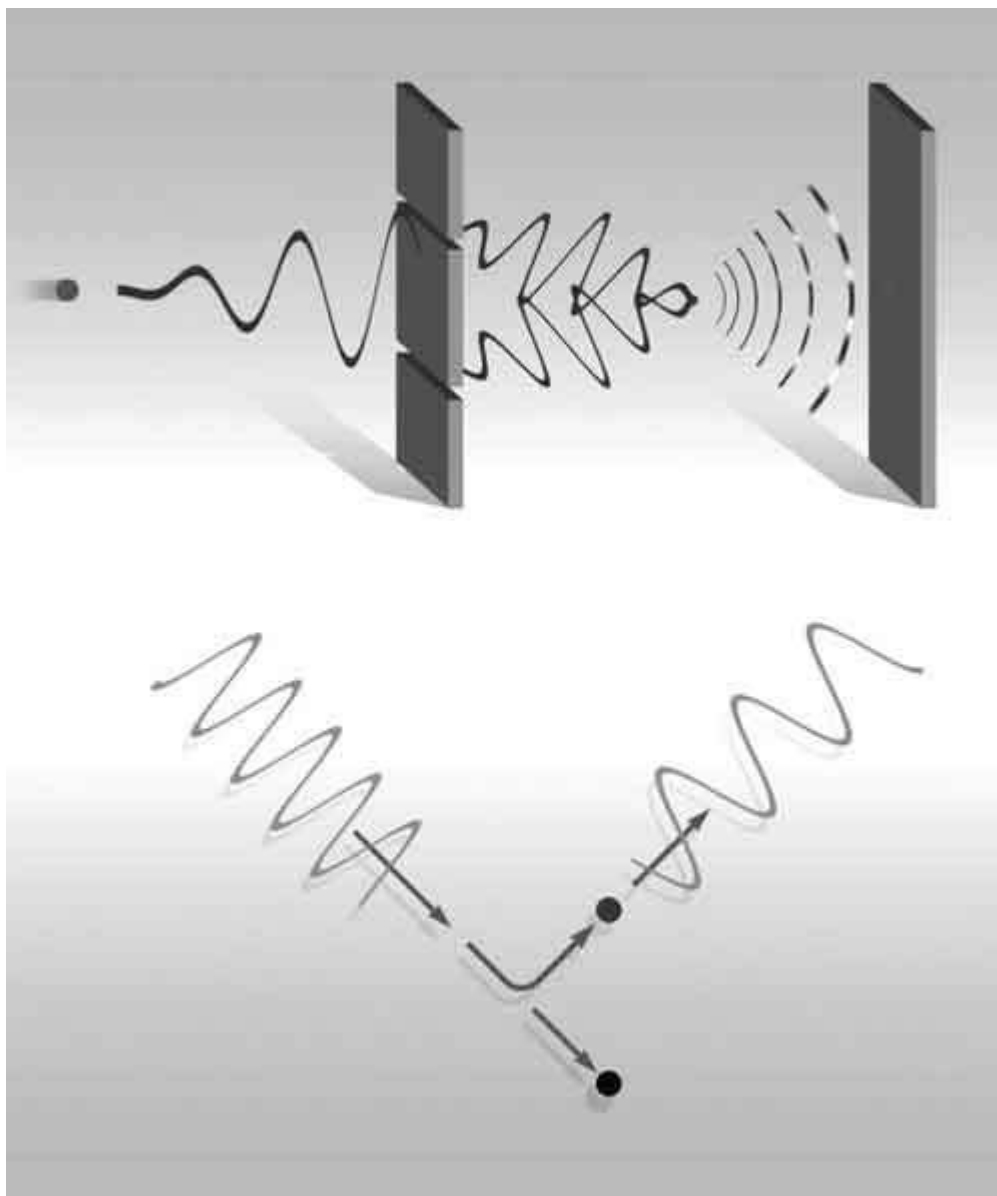
Таким образом, чтобы узнать что-либо о системе, нам необходимо провести измерения, но при измерении мы часто вносим в систему изменения, которых невозможно избежать, поэтому в итоге мы оказываемся не в силах постичь ее истинную природу. В макроскопическом мире эту проблему, как правило, можно обойти, но на квантовом уровне все иначе.

Гамма-микроскоп Гейзенберга

В рассеянии Комптона рентгеновское излучение направлено на твердую мишень – в оригинальном эксперименте использовалась пластина графита, – и анализу подвергаются отраженные рентгеновские лучи. Выясняется, что частота рентгеновского излучения немного падает после отражения. Артур Комптон успешно объяснил это (используя выявленную Планком взаимозависимость частоты и энергии), сказав, что частицы отталкиваются друг от друга, причем из мишени выбиваются электроны, которые уносят с собой часть энергии достигающих мишени фотонов рентгеновского излучения.

Эта ситуация противоположна тому, что наблюдается в эксперименте с двумя прорезями с атомами. В этом случае атом начинает как частица, ведет себя, как волна, проходя через прорези, и снова оказывается частицей на заднем экране. В комптоновском рассеянии фотон начинает как волна (с некоторой частотой), ведет себя, как частица, при столкновении с электроном и наконец снова регистрируется как волна при измерении его частоты. В обоих экспериментах мы используем понятие корпускулярно-волнового дуализма атомов и света.

Но упоминание о корпускулярно-волновом дуализме не помогает нам понять, как происходят все процессы. Сама фраза представляет собой отголосок ранней квантовой теории – печально, что она до сих пор всплывает при изучении этого предмета.



В зависимости от проводимого эксперимента мы видим фотон, который ведет себя либо как волна, либо как частица. В эксперименте с двумя прорезями (вверху) фотон начинает движение в качестве локализованной частицы, ведет себя подобно волне, проходя через обе прорези и интерферируя по другую сторону первого экрана, и в конце концов снова обнаруживается в качестве локализованной частицы. В рассеянии Комптона (внизу) он начинает движение как волна с определенной длиной волны, ведет себя, подобно частице, при столкновении с электроном и в конце концов снова обнаруживается в качестве волны с чуть более длинной длиной волны в связи с потерей импульса при столкновении.

Я снова описал комптоновское рассеяние, потому что оно невероятно похоже на мысленный эксперимент, предложенный в середине 1920-х годов Вернером Гейзенбергом. Посредством этого эксперимента он сумел вывести свою знаменитую формулу принципа неопределенности, подчеркнув, как факт наблюдения за квантовой частицей сбивает ее с изначального пути. К несчастью для такого гения, как Гейзенберг, здесь он не попал в точку. Нильс Бор сразу прямо заявил ему об этом и даже однажды довел его до слез – эти ребята очень серьезно относились к своей работе. И все же пример Гейзенберга и по сей день остается запутанным и бесполезным.

Идея задействовала прибор, который Гейзенберг назвал гамма-микроскопом. Чтобы рассмотреть что-то под обычным микроскопом, мы светим на объект видимым светом, который затем отражается в линзы микроскопа. Но это бесполезно при изучении объектов, размер которых меньше длины волны самого света (нескольких десятитысячных миллиметра), так как такой объект будет не в силах отразить свет. Но рентгеновские лучи и гамма-лучи представляют собой типы электромагнитного излучения с гораздо более короткими волнами, а следовательно, могут быть использованы для наблюдения за более мелкими объектами.

Гамма-микроскоп Гейзенберга представлял собой гипотетическое устройство, которое, как он полагал, может быть использовано, чтобы «увидеть» электрон, руководствуясь идеей комптоновского рассеяния. Гейзенберг утверждал – и был прав, – что для определения положения электрона гамма-фотон должен ударить по нему и отскочить обратно сквозь линзу микроскопа. Но при этом электрон получит «толчок», который изменит его импульс. С учетом разрешающей способности микроскопа и длины волны фотона Гейзенберг сумел вывести свое уравнение неопределенности. Оно гласит, что произведение двух величин, одна из которых дает неопределенность положения электрона, а другая – неопределенность его импульса, всегда будет больше постоянной Планка. Хотя постоянная Планка невероятно мала, она – что важно – не равняется нулю. А это значит, что неопределенность будет всегда – либо в положении частицы, либо в ее импульсе (либо и в том, и в другом). Любой из этих параметров можно точно измерить, но только за счет потери знания о другом.

Проблема с гамма-фотонами заключается в том, что, имея очень короткие волны, они – по формуле де Бройля – обладают очень высоким импульсом. Так что, чем точнее мы определяем положение электрона, тем сильнее мы его толкаем в процессе. Если мы попытаемся «разглядеть» электрон, используя менее энергетический, а следовательно, более мягкий свет, нам понадобится свет с более длинными волнами. Но теперь мы не сможем столь точно определить положение электрона.

Впрочем, мы видели, что уравнение неопределенности является следствием взаимосвязи положения и импульса волновых функций частицы. Хотя пример Гейзенберга может показаться гораздо более простым и понятным, чем описание волновых функций, он забыл о важном моменте. Его выводы основывались на корпускулярно-волновом дуализме фотонов, в то время как электрон он все время считал точечной частицей! На самом деле и к электрону, и к фотону нужно относиться на равных условиях.

И что нам это дает? Скажу так: пытаюсь пронаблюдать за чем-то вроде электрона, мы неизбежно возмущаем его, однако это не основа принципа неопределенности, а лишь дополнение к нему. Принцип неопределенности представляет собой гораздо более фундаментальный аспект квантового мира и может быть понят лишь настолько, насколько мы понимаем природу волновой функции. Таким образом, принцип неопределенности нельзя считать результатом нашей неуклюжести в попытке обнаружить электрон, установив за ним наблюдение. В конце концов, не сомневаюсь, даже сам Исаак Ньютон признал бы, что мы точно нарушим покой такого крошечного тела, как электрон, столкнув его с частицей света^[33].

Что ж, теперь, когда я объяснил, что проблема измерения не сводится к тому, что можно объяснить при помощи классической механики, мы можем внимательнее ознакомиться с настоящей проблемой. Как выясняется, она гораздо фундаментальнее идеи о корпускулярно-волновом дуализме и не требует применения принципа неопределенности.

«А потом происходит еще кое-что»

В Главе 3, описывая идею судьбы и предсказания будущего, я пришел к выводу, что квантовая механика спасает нас от депрессивного ньютоновского представления о

детерминистской, механической вселенной, где все, что когда-либо случится, заранее предопределено, а следовательно, теоретически может быть предсказано. Вместо того чтобы получить возможность точно предсказывать будущее, решая уравнения Ньютона, мы можем лишь предсказывать вероятность различных исходов.

Такова суть квантового индетерминизма. Но разве уравнение Шрёдингера, которое мы используем в квантовом мире вместо ньютоновских уравнений, действительно представляет собой источник этого индетерминизма? Ответ, как ни странно, нет. На самом деле уравнение Шрёдингера как раз представляет собой пример полного детерминизма: зная значение волновой функции в любой момент времени, решив уравнение, я могу точно вычислить ее значение для любого момента в будущем. Идея вероятности вступает в дело лишь тогда, когда мы хотим отложить ручку и бумагу, отключить компьютер и сделать предсказания о результатах настоящих измерений, используя свои знания о волновой функции в момент этих измерений.

При всей своей успешности и математической силе формализм квантовой механики не говорит нам, как сделать шаг от уравнения Шрёдингера к тому, что мы видим, когда проводим конкретное измерение изучаемой квантовой системы. По этой причине отцы-основатели квантовой механики вывели целый ряд «постулатов»: законов, которые представляют собой дополнение к квантовому формализму и дают нам способ перевода волновой функции на язык определенных ответов, или «наблюдаемого», то есть конкретных параметров, которые мы можем наблюдать, таких как положение, величина импульса или энергия электрона в определенный момент времени.

Один из этих постулатов вам уже знаком: он гласит, что вероятность обнаружения частицы в определенном месте можно вычислить путем сложения квадратов двух чисел, которые определяют значение волновой функции в этом положении. Это правило основано не на математике, но оно работает. Другие постулаты также связаны с тем, какие типы измерений можно провести и чего нам следует ожидать, когда мы проводим конкретное измерение. Они дают нам специализированный набор инструкций, как действовать, когда нам приходится отойти от «детерминистского» уравнения Шрёдингера и сравнить его предсказания с наблюдениями.

Идея измерения в квантовой механике расплывчата и малопонятна. В связи с этим физики с радостью приняли прагматичный подход, предложенный Бором, который полагал, что измерение включает в себя таинственный процесс, называемый «необратимым актом усиления», который происходит, когда квантовая система взаимодействует с измерительным прибором. Важно отметить, что измерительный прибор в этом случае должен описываться классической физикой, а следовательно, не являться квантовым объектом. Но как, почему и когда происходит этот процесс измерения? Любой измерительный прибор, будь это экран в эксперименте с двумя прорезями, вольтметр, счетчик Гейгера^[34], сложный аппарат со множеством рычагов и шкал или даже человек-экспериментатор, состоит из атомов. Так где нам провести черту между квантовой системой, которая подчиняется квантовым законам, и классической системой, выступающей в качестве измерительного прибора?

Кот Шрёдингера

В тот же год, когда Эйнштейн, Подольский и Розен опубликовали свою знаменитую статью, в которой, как они считали, подчеркивалась абсурдность некоторых черт квантовой механики (индетерминизма и нелокальности), Эрвин Шрёдингер тоже не вынес квантовой странности. Он набросился на проблему измерения, предложив один из самых известных мысленных экспериментов во всей физике. Поразительно, сколько физиков запуталось, пытаясь показать или объяснить предполагаемый парадокс, который продемонстрировал Шрёдингер. Многие годы появлялись все новые и новые фантастические решения этой проблемы – как будто квантовая механика и так не была достаточно сложной для понимания.

Шрёдингер спросил, что случится, если мы поместим кота в коробку с устройством, содержащим смертельно опасный яд и ядро радиоактивного атома. Испущенная при распаде ядра частица запустит механизм, который откроет яду доступ в коробку, в результате чего кота настигнет мгновенная смерть. (Защитникам прав животных не стоит волноваться: на самом деле такой эксперимент никогда не проводился, потому что результатов можно достичь – что и было сделано – и без живого кота.)

Момент распада радиоактивного ядра представляет собой одно из тех событий, которые даже теоретически невозможно предсказать с достаточной точностью. Мы можем лишь сказать, что существует определенная вероятность, что конкретное ядро распадется через определенное время. Однако мы также можем сказать, что в тот момент, когда мы закрываем крышку коробки, в которой сидит здоровый кот, ядро точно еще не распалось. С этого момента его описывает квантовая суперпозиция. Следовательно, его волновая функция должна состоять из двух частей, которые описывают и распавшееся, и нераспавшееся ядро. Само собой, вероятность обнаружения ядра в одном из этих состояний со временем меняется. Когда пройдет очень много времени, описывающая нераспавшееся ядро часть волновой функции станет лишь крошечным компонентом, а вероятность обнаружения распавшегося ядра почти достигнет ста процентов, как мы и ожидаем.

Пока что все понятно. Но здесь Шрёдингер последовал букве (квантового) закона. Так как кот тоже состоит из атомов, его также должна описывать волновая функция – конечно, очень сложная, но это не меняет сути. Поскольку судьба кота теперь находится в сильной корреляции с судьбой радиоактивного ядра, мы должны описывать их посредством запутанного состояния. Следовательно, волновая функция кота будет также неизбежно поделена и окажется в суперпозиции двух состояний: одна ее часть будет описывать живого кота, а другая – мертвого!

Позвольте мне еще раз напомнить вам о фокусе с двумя прорезями. Если мы не наблюдаем за атомом, он не проходит сквозь конкретную прорезь – нам следует считать, что он прошел сквозь обе прорези одновременно. Это не просто математический трюк, а единственный способ объяснить вполне реальную картину интерференции, которую мы наблюдаем. Та же проблема возникает и в случае с котом Шрёдингера. Пока мы не откроем коробку, чтобы проверить состояние кота, мы не можем сказать, что он жив или мертв (это равносильно тому, что сказать, что атом проходит сквозь конкретную прорезь), поскольку он пребывает в обоих состояниях одновременно! Конечно, это просто смешно. Кот должен быть либо жив, либо мертв, и мы никак не можем повлиять на это снятием крышки. Разве суть тут не в том, что у нас просто недостаточно знаний о том, что уже произошло (или еще не произошло)? Именно так и утверждал Шрёдингер.

Если вы хотите встать на его сторону, я должен спросить вас, где мы ошибаемся? Почему кот – или, если угодно, «сложный набор квантовых частиц» – тоже вынужден пребывать в суперпозиции из-за того, что его состояние запутано с суперпозицией радиоактивного ядра?

Бор и Гейзенберг не утверждали, что кот на самом деле жив и мертв одновременно. Они настаивали – и с тех пор с этим соглашаются большинство физиков, – что мы не можем говорить о существовании отдельной реальности для кота, пока не откроем коробку и не увидим все своими глазами! Их аргументы сводились к тому, что, пока коробка закрыта, нам вообще нечего сказать о «текущем» состоянии кота. Мы можем довольствоваться лишь его волновой функцией, а это просто набор цифр. Так как мы не можем описать реальность в отсутствие измерений, мы даже не предпринимаем попыток к этому. Только подготовившись к открытию коробки, мы можем воспользоваться волновой функцией, чтобы рассчитать вероятность обнаружения кота живым или мертвым. Многократное повторение этого эксперимента покажет нам, что эти предсказания верны (точно так же, подбросив много раз

монетку, мы удостоверимся, что орел и решка выпадают со статистической вероятностью 50/50).

Но что, если поместить в коробку человека-волонтера? Ладно, пусть яд будет не смертельно опасным, достаточно, чтобы он просто вызывал потерю сознания^[35]. Конечно же, когда мы откроем коробку, мы не сможем убедить волонтера, что, находясь внутри, он одновременно пребывал и в сознании, и без сознания. Если он в сознании, он сообщит нам, что не почувствовал никакого недомогания, за исключением тревоги. Если же он без сознания, то, придя в себя, он сможет рассказать, что через десять минут после закрытия коробки услышал, как сработало устройство, и тут же почувствовал головокружение. А затем ему к носу уже поднесли нюхательную соль.

Что в этом аргументе не так? Удалось ли Шрёдингеру показать непоследовательность теории? На самом деле квантовая механика рождает более серьезные дилеммы, чем простое утверждение, что до открытия коробки волновая функция кота включает в себя часть живого кота и часть мертвого. Пока мы не заглянем в коробку, мы можем лишь распределить вероятности различных исходов. Из-за суперпозиции различных состояний кота мы получаем определенную вероятность обнаружения его живым, другую вероятность обнаружения его мертвым и – что особенно странно – третью вероятность обнаружения его и живым, и мертвым одновременно. Это объясняется техническим определением квантовой вероятности^[36]. Но квантовые законы этого не позволяют. Они гласят, к счастью, достаточно корректно, что мы обнаружим либо живого кота, либо мертвого кота – и никогда не увидим кота в жутком промежуточном состоянии.

Не знаю, как вы, но я могу справиться только с существованием вероятности обнаружения живого или мертвого кота. Я могу списать это на свое невежество и притвориться, что в этом нет ничего ужаснее незнания, какой подарок получил на Рождество, пока не распакуешь его. Более того, возможно, я даже готов забыть о том, что кот *на некоторое время* оказывается и живым, и мертвым одновременно, и не скатиться в бессмысленные метафизические размышления. Но что же делать с третьим вариантом – с возможностью *обнаружить* кота в неловком положении, когда он пребывает и в живом, и в мертвом состоянии одновременно, на что так очевидно указывает квантовый формализм? Квантовые постулаты обходят эту дилемму, утверждая, что допустимы лишь «разумные» результаты измерений. Само собой, все это говорится на соответствующем жаргоне, но факт остается фактом: до недавнего времени никто полностью не понимал, что происходит с этими промежуточными состояниями кота Шрёдингера (как их стали называть).

Даже сегодня многие дискуссии о квантовом измерении не учитывают, что парадокс кота Шрёдингера, возможно, наконец разрешен. Много говорится о том, что моментом «измерения», которое приводит к коллапсу суперпозиции и определенному исходу, является сам факт открытия коробки. Одно время было даже модно рассуждать о том, что измерение требует сознательного, наделенного интеллектом наблюдателя. В конце концов, раз уж никто не знает, где провести границу между квантовым миром волновых функций и суперпозиций и классическим миром определенных исходов при измерениях, может, нам и не стоит проводить эту границу без особой необходимости? Так как даже измерительный аппарат (детектор, экран, кот) представляет собой лишь набор атомов и должен вести себя, как любая другая квантовая система, пускай и очень большая, то отступать от квантового описания нам приходится лишь в одном случае – когда оно регистрируется нашим сознательным разумом. (Да, я знаю, что кот тоже обладает сознанием, но приверженцы этого подхода утверждали, что у него нет докторской степени, а следовательно, на роль наблюдателя он не подходит!) До сих пор существует относительно распространенная точка зрения, что, так как мы не до конца понимаем квантовую механику и не понимаем происхождение сознания, они должны быть связаны.

Меня всегда удивляло, сколько людей придерживалось этой точки зрения. Одно из основных положений квантовой механики заключается в том, что результаты измерений определяются не только характеристиками изучаемой квантовой системы, но и самим актом проведения измерений. Многие также идут дальше и утверждают, что говорить о квантовой системе, не упоминая при этом измерительный прибор, вообще не имеет смысла. Но проведение границы между измеряемым и измеряющим на уровне человеческого сознания равносильно тому, что философы называют солипсизмом – идеей, что наблюдатель находится в центре вселенной, а все остальное представляет собой лишь плод его воображения.

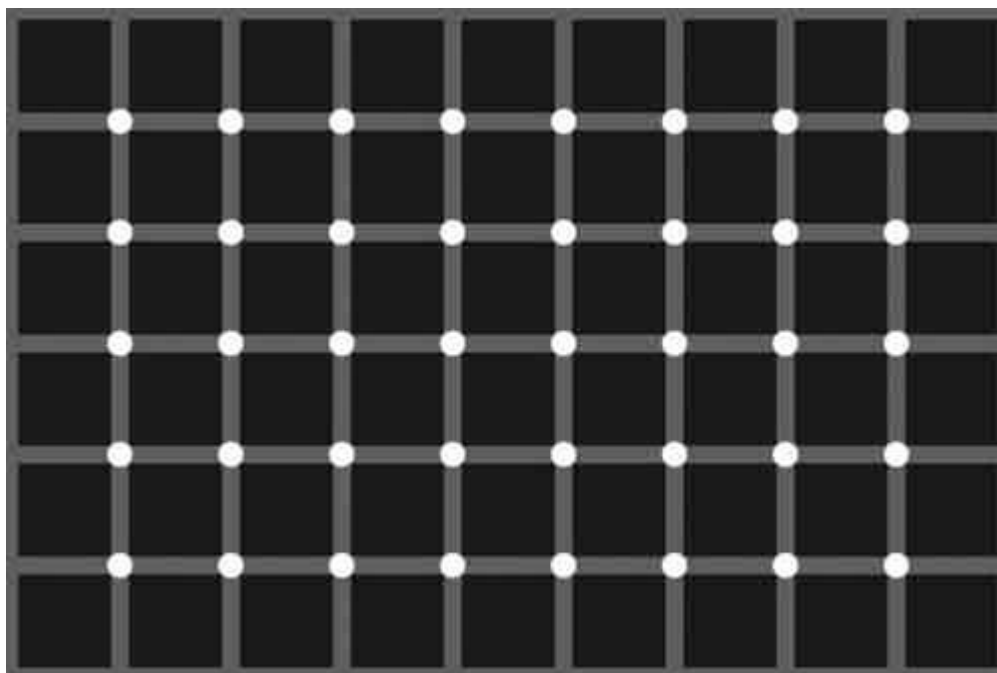
В этом отношении сообщение волонтера о том, что он чувствовал, находясь в коробке перед открытием крышки, не представляет важности. Важно лишь то, что для вас – тех, кто находится за пределами коробки, – он остается в квантовой суперпозиции, пока вы сами не поднимете крышку, а ваше сознание не заставит волновую функцию схлопнуться и принять лишь одно значение.

Не говори, какой счет

Недавно мы с братом болтали о квантовой механике и футболе (о чем еще говорить?), и он продемонстрировал то чувство, которое, должно быть, знакомо многим из нас и очень похоже на роль наблюдателя в квантовой механике. Видите ли, мы оба всю жизнь болеем за «Лидс Юнайтед»^[37], и брат частенько задумывался, что, если он запишет матч «Лидса» на видео, а затем сядет смотреть его, не зная счета, для него исход матча будет еще не решен. Но если мы доведем стандартную интерпретацию квантовой механики до логического завершения, то получится, что дело не в его незнании финального счета, ведь информация «доступна» и известна миллионам людей. Для него суперпозиция всех возможных результатов схлопывается только в тот момент, когда он досмотрел матч до конца и увидел единственный измеренный им исход – итоговый счет на экране.

Однако, пока он не позвонит мне, чтобы сказать счет, полагая, будто я его еще не знаю, для меня мой брат будет пребывать в суперпозиции обладания знанием о всех возможных результатах. Услышав от него новости, я, в свою очередь, проведу измерение его квантового состояния и заставлю суперпозицию всевозможных счастливых и печальных версий брата схлопнуться в одну.

Я пишу это, и у меня в ушах снова звучат слова Джули. Но тут мне пришлось бы с ней согласиться – это действительно «просто бред»! Я предпочитаю думать, что есть некая «объективная реальность», которая существует вне зависимости от того, наблюдаю ли я. Вот более серьезный пример: ядро радиоактивного урана, похороненное в земле, испустит альфа-частицу, которая может оставить видимый след дефектов кристалла в скале. Неважно, когда мы посмотрим на эту скалу – сегодня, через сотню лет или никогда. След будет там. Что, если скала находится на Марсе и никогда не видывала наделенного сознанием наблюдателя? Находится ли она в неопределенном состоянии, одновременно имея на себе след и не имея его? Очевидно, измерения каким-то образом должны происходить всегда, и сознательные наблюдатели, будь они в белых халатах или без них, не могут влиять на их исход. Правильно будет сказать, что измерение считается произошедшим в момент регистрации «события» или «явления». При желании мы сможем понять это позже.



Простая оптическая иллюзия грубо демонстрирует, как факт измерения влияет на квантовую систему. Внимательно посмотрев на один из белых кругов, вы заметите черные точки, которые появляются и исчезают в некоторых из окружающих его кругов. Но стоит вам тотчас перевести взгляд на одну из этих черных точек, как круг снова станет белым и останется таковым под вашим наблюдением. Вам не удастся поймать черную точку с поличным. Естественно, секрет этого фокуса не имеет ничего общего с квантовой механикой, но мне кажется, что аналогия довольно хороша.

Это утверждение может показаться таким логичным и очевидным, что вам простительно недоумевать, как квантовые физики вообще могут быть настолько глупыми, чтобы придерживаться противоположных взглядов. Но не забывайте, если мы что-то и узнали о квантовой механике, так это то, что поиск рациональных объяснений в ней абсолютно бесполезен. О проблемах квантового измерения размышляли многие великие умы – и большинство их выводов не стоит отрицать столь поспешно.

За прошедшие годы я не раз обсуждал все это со своим коллегой, физиком-теоретиком Рэем Макинтошем. Мы не всегда и не во всем соглашались, но почти всегда я прихожу к заключению, что он приводит веские доводы. Самые интересные наши «дебаты», как правило, проходят в барах, где мы проводим вечера, когда ездим в командировки на конференции по ядерной физике. (Физики-теоретики частенько выбирают бары для таких глубоких дискуссий, так как они лишены «удовольствия» всю ночь напролет сидеть в лабораториях, как физики-экспериментаторы.) В ответ на критику точки зрения о том, что ничто не существует до проведения измерений (и коллапса соответствующей волновой функции), Макинтош обычно заявляет следующее. Само собой, электрон – или атом, или Луна – существует и до измерения. Все объекты, будь они микроскопическими или макроскопическими, обладают множеством определенных параметров (то есть величин, которые не пребывают в суперпозиции более чем одного значения), таких как их масса или электрический заряд. Эти параметры не подвержены неопределенности. Следовательно, тот факт, что до проведения измерений нам приходится полагаться на волновую функцию, не означает, что описываемый ею объект нереален. Конечно же нельзя сказать, что определенные его параметры, такие как его точное положение или энергия, обладают конкретными значениями, однако такова природа квантовых объектов. Нам не стоит отрицать их существование, только потому что мы не можем вообразить, каковы они на самом деле.

Два этапа проблемы измерения

Так что представляет собой измерение? Что мы имеем в виду под «наблюдением»? И в какой момент происходит этот магический переход от волновой функции к реальности? Мы знаем следующее: измерение, прежде всего, должно подразумевать некоторое взаимодействие между измерительным устройством, которое я пока не определил, и квантовой системой. Последняя до этого момента может пребывать в суперпозиции различных состояний, соответствующих различным возможным значениям измеряемой величины. Это взаимодействие неизбежно приведет к запутанному состоянию системы и внешнего измерительного устройства, в результате чего последнее окажется в суперпозиции измерения всех различных возможных значений величины одновременно. И что тогда?

Давайте более внимательно проанализируем настройку интерферометра частиц из прошлой главы. Не забывайте, при входе в устройство волновая функция единственного атома разделится на два компонента, каждый из которых пойдет по одному из двух ответвлений прибора. Хотя я и должен описывать атом с помощью волновой функции, я понимаю, что должно происходить нечто странное, так как на выходе из прибора я вижу реальный сигнал интерференции. Я также знаю, что, если я загляну сквозь окошко в одно из ответвлений интерферометра, чтобы проверить, прошел ли атом по этому маршруту, я увижу лишь половину атомов. Но теперь, само собой, картина интерференции пропадет.

Чтобы упростить понимание, я допущу, что засекаю атом, открывая маленькое окошко в ответвлении и замечая крошечную вспышку, когда свет отражается от пролетающего мимо атома. Что же произойдет, если я решу закрыть глаза? Теперь у меня не будет информации о том, каким путем пошел атом. Означает ли это, что картина интерференции вернется? Это подразумевало бы, что физический акт опускания век контролирует исход эксперимента. Аргумент не слишком убедителен. Теперь становится очевидным, что измерение все равно происходит, поскольку я открыл окошко и позволил свету проникнуть внутрь и вступить во взаимодействие с атомами. Картина интерференции исчезает вне зависимости от того, открыты ли у меня глаза. Само собой, я мог бы утверждать, что сигнал интерференции в конце все еще остается возможным исходом (на самом деле одним из трех – атом либо был обнаружен в этом ответвлении, либо не был в нем обнаружен и, должно быть, прошел сквозь другое ответвление, либо был и обнаружен – с помощью света, проникающего в окошко, – и не обнаружен одновременно). Третий из вариантов представляет собой состояние кота Шрёдингера (который жив и мертв одновременно) и приводит к регистрации интерференции интерферометром. Конечно, открыв глаза, я не могу увидеть этот вариант, и сторонники идеи о сознательном наблюдателе утверждают, что именно то, вижу я атом или не вижу, в итоге устраняет вариант, который приводит к возникновению интерференции.

Проблема становится яснее, когда мы устанавливаем возле окошка в ответвлении интерферометра инструмент, который фиксирует вспышку света при прохождении атома мимо окошка и запоминает ее. Этот инструмент играет ту же роль, что и кот Шрёдингера в коробке. Разве инструмент способен существовать в суперпозиции фиксации и нефиксации вспышки?

В целом мы можем выделить два отдельных вопроса, связанных с проблемой измерения в квантовой механике:

(i) Почему мы не можем увидеть суперпозиции таких макроскопически различимых состояний (к примеру, одновременно живых и мертвых котов или регистрирующие и не регистрирующие сигналы приборы)? В конце концов, когда окошко закрыто, мы видим эффект такой суперпозиции в интерферометре и, конечно, в эксперименте с двумя прорезями. Но там состояния относятся к микроскопической шкале и связаны с поведением отдельных атомов.

(ii) Даже если бы существовал способ избавиться от этих неопределенных состояний кота Шрёдингера до установления наблюдения, разве нам не нужен был бы дальнейший коллапс волновой функции, чтобы устранить все оставшиеся варианты, за исключением того, который мы видим в итоге? Таким образом, кот Шрёдингера мог бы быть жив, мертв или и жив, и мертв одновременно. Устранение последнего варианта не дает нам информации, какая из двух оставшихся возможностей исчезнет, когда мы откроем коробку.



В атомном интерферометре волновая функция атома вынужденно пребывает в суперпозиции следования по обоим ответвлениям одновременно. Но если открыть в одном из ответвлений окошко, чтобы проверить, каким путем она прошла, соответствующий другому ответвлению компонент волновой функции сразу же схлопнется до нуля. Даже не засекая движения в наблюдаемом ответвлении, мы все равно заставляем квантовую реальность стать определенной частицей, которая в таком случае следует по другому ответвлению.

Декогеренция

В 1980-х и 1990-х годах первая часть проблемы прояснилась. Физики наконец поняли, что происходит, когда изначально изолированная квантовая система, такая как отдельный атом, прекрасно чувствующая себя в суперпозиции, становится запутанной с макроскопическим объектом. Как выяснилось, суперпозиция различных состояний, в которой вынужденно оказывается столь сложная система, включающая в себя триллион триллионов атомов,

просто не может существовать достаточно долго и очень быстро исчезает, или декогерирует. Можно сказать, что деликатная суперпозиция безвозвратно пропадает среди колоссального числа других возможных суперпозиций, соответствующих различным возможным комбинациям взаимодействий между всеми атомами макроскопической системы. Восстановление оригинальной суперпозиции немного похоже на попытку перетасовать колоду карт таким образом, чтобы все четыре масти оказались отдельно друг от друга, однако осуществить его гораздо более сложно.

Декогеренция представляет собой реальный физический процесс, который постоянно происходит повсеместно. Он запускается, когда квантовая система теряет изоляцию от окружающей макроскопической среды, а ее волновая функция становится запутанной со сложным состоянием этой среды. Средой может быть что угодно – от фоточувствительного экрана до электронного устройства и даже до окружающих систему молекул воздуха. Если связь с этой внешней «средой» оказывается достаточно прочной, изначальная деликатная суперпозиция очень быстро теряется. На самом деле декогеренция представляет собой один из самых быстрых и эффективных процессов во всей физике. Именно эта выдающаяся эффективность и стала причиной, по которой декогеренция так долго не была открыта. Только сегодня физики понимают, как ее можно контролировать и изучать. В Главе 10 я опишу несколько проведенных в последние годы примечательных экспериментов, в которых мы действительно можем увидеть декогеренцию в действии.

Строго говоря, физики утверждают, что волновая функция среды теряет все остатки изначальных корреляций между двумя своими запутанными частями. Пожалуй, ярче это можно описать следующим образом: как только квантовая суперпозиция становится запутанной с внешним миром, вся странность пропадает так быстро, что мы не успеваем засечь ее с поличным.

Процесс декогеренции по-прежнему активно изучается и еще не до конца понят. Но мы хотя бы можем начать распутывать первую часть проблемы измерения. Мы никогда не видим кота Шрёдингера живым и мертвым одновременно, потому что декогеренция в коробке происходит задолго до того, как мы ее откроем. Здесь дело даже не в коте – все случается гораздо раньше из-за наличия устройства, в котором заключены радиоактивное ядро и яд. Именно это и формирует макроскопическую среду, непосредственно окружающую радиоактивное ядро.

Мы можем применить идею декогеренции и к другому примеру – той ситуации, когда детектор регистрирует, по какому из ответвлений интерферометра или сквозь какую из прорезей прошел атом. Здесь все объясняется проще. Чтобы получить информацию о положении атома, детектор должен установить связь с волновой функцией атома, и их запутанность быстро приводит к декогеренции. Обратите внимание, я написал «с волновой функцией атома», а не «с атомом», так как, если детектор не обнаружит атом, это будет означать, что тот пошел другим путем. Кроме того, это «измерение» уничтожит картину интерференции. Так что, хотя детектору и атому нет нужды вступать в физическое взаимодействие в классическом смысле, но с волновой функцией он все же оказывается в запутанном состоянии.

Без детектора, установленного за одной из двух прорезей, декогеренцию провоцирует второй экран. Однако в этом случае остановить появление картины интерференции уже невозможно – две части волновой функции атома слишком долго оставались одни, чтобы между ними возникла интерференция. Само собой, весь фокус с двумя прорезями нужно проводить в вакууме, ведь иначе атом будет сталкиваться с молекулами воздуха и сбиваться с пути. Это все равно что сказать, что декогеренцию в таком случае будет вызывать сам воздух. Впрочем, я чересчур небрежно подобрал слова. Используя фразы вроде «сталкиваться с молекулами», я представил это так, словно атом уже представляет собой классическую частицу с

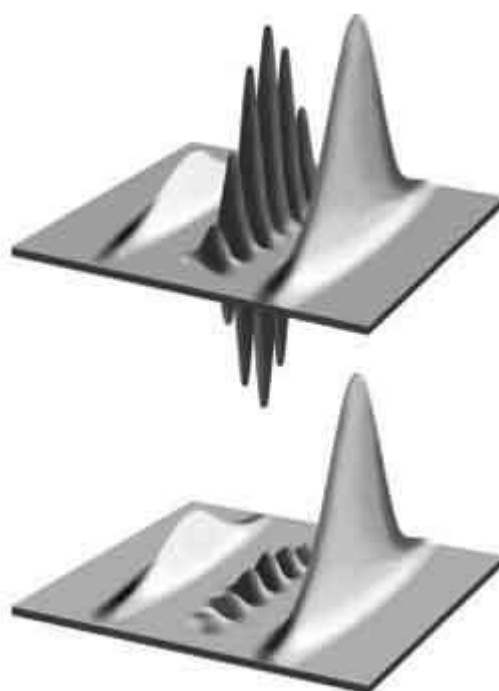
предопределенным положением. Теперь мы знаем, что до декогеренции и проведения измерения мы можем описать атом только при помощи его волновой функции.

Решает ли декогеренция проблему измерения?

Кто-то скажет нет, ведь она не помогает в решении второго вопроса, а именно каким образом после измерения выбирается один из возможных вариантов, каждый из которых представляет собой вероятный исход. Декогеренция объясняет, почему мы никогда не видим одновременно живого и мертвого кота, но не говорит, как выбирается одна из двух альтернатив. Квантовая механика остается вероятностной, а эта непредсказуемость отдельных измерений никуда не пропадает.

Другие физики полагают, что декогеренция вообще не особенно проясняет проблему измерений, даже на уровне избавления от суперпозиций. Они утверждают, что суперпозиции просто оказываются похороненными в сложности запутанной волновой функции квантовой системы и макроскопического измерительного устройства, однако в принципе никуда не исчезают. Мы просто не можем их восстановить. Именно поэтому мы и не видим квантовую странность в действии.

Те же, кто с большим оптимизмом смотрит на объяснение проблемы измерений посредством понимания декогеренции, придерживаются несколько иного взгляда. Они говорят, что, хотя вероятностная природа квантовой механики и означает, что мы даже теоретически не можем с уверенностью сказать, обнаружим мы кота живым или мертвым, это является эквивалентом знакомой нам статистической вероятности. Проблема заключается лишь в том, что мы не знаем, какой вариант выбран, поскольку у нас в распоряжении есть только волновая функция. Но кот уже либо жив, либо мертв!



Способ, которым процесс декогеренции заставляет квантовую странность *исчезнуть*, можно представить в качестве SD-диаграммы под названием распределение Вигнера. Две горизонтальные оси означают положение и величину импульса, так что каждый из пиков на неровной поверхности соответствует конкретному положению и величине импульса квантовой частицы. Два широких пика обозначают два возможных положения частицы при установленном наблюдении. Очевидно, вероятность ее обнаружения справа вдвое больше вероятности ее обнаружения слева, так как правый пик вдвое выше. Колебания в центре

соответствуют условиям интерференции. Они не соответствуют возможным результатам измерения, а представляют собой те самые состояния, в которых кот одновременно и жив, и мертв.

На верхней диаграмме эти колебания интерференции значительно выше, поскольку декогеренция еще не произошла. Но очень скоро (нижняя диаграмма) декогеренция заставляет их исчезнуть. В то же время два физически реализуемых варианта остаются незатронутыми.

Таким образом, установление связи с окружающей квантовую систему средой, которое неизбежно происходит, когда систему больше нельзя считать изолированной, приводит к запутанности, а следовательно, и декогеренции. Означает ли это, что случилось измерение? Если в дополнение к декогеренции выбирается один из оставшихся возможных вариантов, то да, измерение произошло. Наблюдателю нет нужды приводить волновую функцию к коллапсу, поскольку единственный исход уже ожидает, когда мы решим его проверить.

Мне кажется, что это еще не все. Я полагаю, что однажды будет объяснен даже процесс выбора, происходящий после декогеренции. Ряд физиков, включая Роджера Пенроуза, считает это возможным. Многие другие, работающие в сфере космологии и квантовой гравитации, верят, что проблема уже решена.

Итак, следующая остановка: различные интерпретации квантовой механики.

Глава 6. Великий спор Формализм против интерпретации

Понимание многих квантовых идей, включая волновую функцию и ее странные свойства, и квантовых постулатов, которые говорят нам, как извлекать из них информацию о субатомном мире, жизненно необходимо для успеха и понимания всей квантовой теории. И все же в первой половине этой книги мы увидели, как трудно перевести сложную математику на язык слов, которые были бы понятны как физикам, так и нефизикам. Иными словами, хотя формализм квантовой механики не вызывает сомнений, никто пока не нашел такого объяснения, или интерпретации, этой теории, которое удовлетворило бы всех без исключения.

В эксперименте с двумя прорезями мы можем очень точно предсказать форму картины интерференции, которая появляется на экране (хотя и не можем предсказать, куда ударит каждый конкретный атом). Гораздо более удивительно, что квантовая механика очень точно предсказывает параметры атомов и молекул и тех частиц, из которых они состоят, а также природу сил, сдерживающих их вместе для формирования окружающих нас богатых и многообразных структур. Способность к таким предсказаниям есть не что иное, как признак успешной научной теории. Особенно поразителен тот факт, что мы можем сделать все эти выводы, не зная, почему мы получаем конкретные результаты. Похоже, мы вполне справляемся и без представления о том, как именно атом проходит сквозь две прорези.

Большинство практикующих физиков научились использовать теорию без понимания, почему она работает. На самом деле многие ведущие физики нашего времени открыто признавали, что никто до конца не понимает квантовую механику! Разве это не должно никого волновать? В этой главе мы изучим различные подходы к интерпретации теории и познакомимся с точками зрения, которые разделяли – и до сих пор разделяют – физики.

Уверен, многим физикам не понравится то, что я изложу в этой главе, так как я собираюсь описывать различные взгляды непредвзято. В конце концов, основная цель этой книги – объяснить, что такое квантовая механика и почему она так необычна. Но с моей стороны было бы нечестно и самонадеянно делать вид, что в квантовом саду благоухают розы. Многие физики, включая целый ряд моих коллег и партнеров-исследователей, считают, что здесь нет никакой проблемы. Они утверждают, что нет никакого смысла заострять внимание на конфликтах между различными интерпретациями того, что, в общем-то, представляет собой полностью понятную, логически последовательную и успешную математическую теорию.

Но было бы столь же нечестно – а эта книга, вероятно, стала бы не такой интересной, – если бы я в определенных случаях не показывал, какой именно позиции придерживаюсь.

Позвольте мне начать с серьезного, но при этом точного утверждения: ни одна интерпретация квантового формализма не может считаться лучше остальных и выбор между ними – лишь вопрос эстетики и вкуса каждого. В связи с этим многие считают бесполезным обсуждение плюсов и минусов различных интерпретаций. Хуже того, многие полагают, что истинной интерпретации нет и вовсе, а существующие представляют собой лишь в равной степени обоснованные способы толкования происходящего.

Эта точка зрения нашла отражения в часто цитируемой интерпретации «заткнись и считай», которая гласит, что, раз уж доказано (по крайней мере, пока), что верную интерпретацию найти невозможно, разговаривать о ней – пустая трата времени. Пускай этими вопросами занимаются философы, а физики пока продолжают использовать квантовомеханический формализм для изучения природы.

Более полувека ведущие физики ломали головы над проблемами интерпретации. Они утверждали, что квантовая механика уникальна среди научных теорий, потому что, обладая огромной предсказательной силой, толковать она по определению может лишь результаты измерений. Только это и должно нас волновать – переживать о необходимости для продвижения вперед единственной интерпретации нам не стоит. Такой прагматичный, или «инструменталистский», подход основан на философии «логического позитивизма», которая была популярна в Европе в период зарождения квантовой механики. Само собой, мне не хочется отклоняться от физики и уходить в философию, но все же я вкратце опишу суть этого подхода: если два человека придерживаются разных мнений, но при этом не могут разрешить свой спор при помощи эмпирических фактов, то в их противоречивых заявлениях нет никакого смысла – лучше им пойти и выпить пива.

Какова моя позиция по этому вопросу? Я придерживаюсь подхода, который называю «заткнись, пока считаешь». Он дает мне свободу размышлять о достоинствах различных интерпретаций квантовой механики, когда я не думаю о греческих буквах, не пишу компьютерный код и не царапаю мелом на доске алгебраические формулы. К несчастью, я мечусь уже почти двадцать лет, но так и не выбрал лучшую для себя интерпретацию. Я бы сказал, что квантовая механика позволяет нам свободно коммуницировать с природой посредством понятных правил математической грамматики, однако нам до сих пор не хватает единого перевода этой коммуникации на язык слов!

При этом я должен признать, что, как и большинство других физиков, я отягощен наследием Бора и так называемой стандартной интерпретацией квантовой механики. Эта интерпретация фигурирует в учебниках квантовой физики и преподается студентам-физикам, как будто она представляет собой единственное доступное пониманию объяснение того, что происходит, хотя в последние годы этот подход и подвержен изменениям. В его защиту говорит то, что он представляет собой самую простую интерпретацию. Это настоящий инструмент прагматика – он дает способы проведения расчетов в квантовой механике и называется просто

копенгагенской интерпретацией. К сожалению, он обходит стороной целый ряд самых глубоких загадок квантового мира и просто оставляет многое за скобками. Однако под общим названием скрывается целый спектр различных точек зрения, выстроенных на одной основе.

Чтобы вы поняли, насколько широко распространена копенгагенская интерпретация, я скажу, что многие положения, уже упоминавшиеся на страницах этой книги, не входят в альтернативные, в равной степени верные интерпретации. К примеру, я подробно остановился на том, что волновая функция представляет собой не реальную физическую сущность, а просто набор чисел, которые позволяют нам делать предсказания по поводу исхода измерений. Об этом говорит только копенгагенская интерпретация, в то время как остальные точки зрения, с которыми вам еще предстоит познакомиться, считают волновую функцию физически реальной. Что еще удивительнее, мне не нужно было настаивать, что в фокусе с двумя прорезями атом должен «каким-то образом» пройти сквозь обе прорези одновременно. Как выясняется, к этому выводу нас не подталкивает ни квантовый формализм, ни экспериментальное наблюдение. В интерпретации де Бройля – Бома мы увидим, что вполне разумно предположить, будто атом прошел либо сквозь одну, либо сквозь другую прорезь, но на выходе при этом все равно получить картину интерференции!

Первым делом давайте внимательнее познакомимся с тем, на чем настаивал Бор и продолжают настаивать многие поколения физиков, называющих себя его последователями.

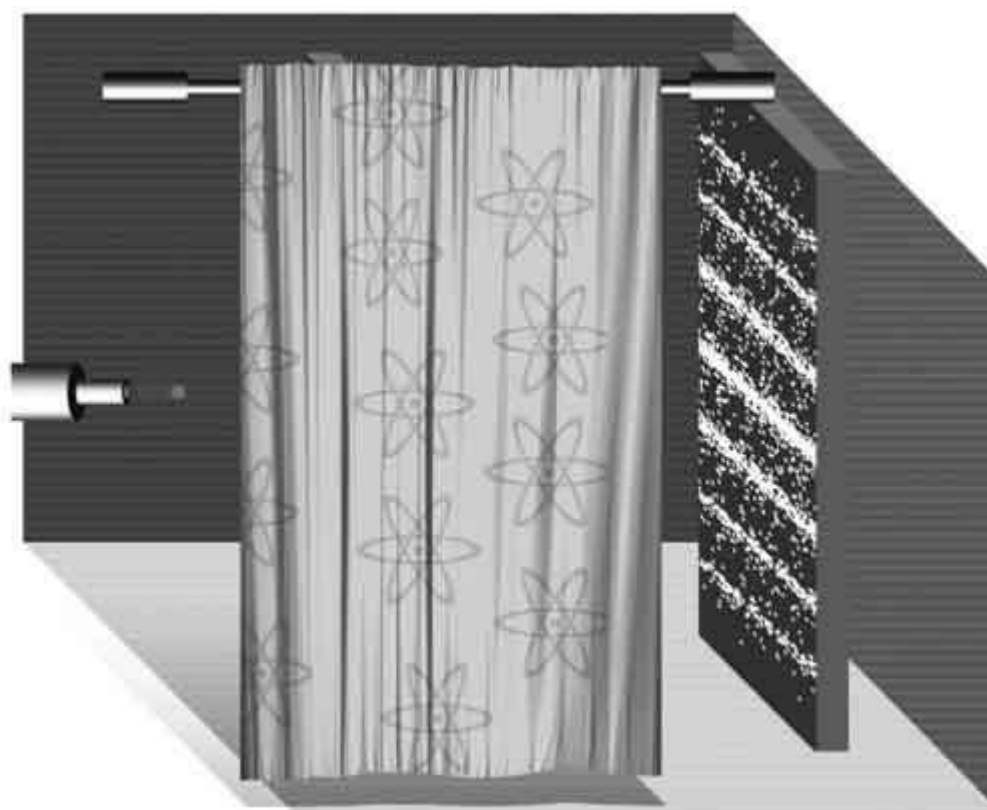
Копенгагенская интерпретация

Копенгагенский подход представляет собой скорее не интерпретацию научной теории, а идеологию или философское учение. С ней согласны не все физики. На самом деле даже утверждалось^[38], что:

«Копенгагенская интерпретация представляет собой не единый, четко определенный и недвусмысленно описанный набор идей, а общий знаменатель для различных точек зрения».

Она была разработана в процессе дискуссий, которые велись во второй половине 1920-х годов между Нильсом Бором и группой блестящих молодых гениев, собранных им в собственном новом институте в Копенгагене. Самым заметным из них был уже знакомый вам Вернер Гейзенберг. Основным вкладом Гейзенберга в физику стала альтернативная волновому уравнению Шрёдингера формулировка квантовой механики, которую стали называть матричной механикой. Я не описывал этот подход, так как в нем задействована сложная математика, однако многие практикующие в сфере квантовой физики исследователи предпочитают именно его, считая его более элегантной и действенной техникой, чем подход Шрёдингера. Часты и случаи, когда требуется комбинация двух этих подходов.

В разработке копенгагенской интерпретации принимали участие и другие ученые, в частности Макс Борн, который первым предложил вероятностную интерпретацию волновой функции. Впоследствии ведущие физики, включая американца Джона Уилера, расширили и прояснили многие идеи Бора. Но в целом копенгагенскую интерпретацию следует считать детищем самого Бора.



Копенгагенское объяснение: так как мы не можем узнать, что происходит за квантовым занавесом, не влияя при этом на результаты, задаваться этим вопросом бесполезно – обсуждать нужно лишь *наблюдаемое*.

Примечательно, что физики и по сей день остаются высокого мнения о взглядах Бора, сформулированных на три четверти века раньше. Лучшее всего это описал физик Роланд Омне (один из авторов идеи декогеренции)^[39]:

«Обыкновенно физическая теория представляется в достаточно точном и последовательном виде, поэтому никому не кажется необходимым цитировать тех, кто стоял у ее истоков; их последователи скорее стараются поддерживать изначальный дух и посыл. Вопреки этому разумному обычаю, самые полные книги о копенгагенской интерпретации являются перепечатками оригинальных статей и последующих комментариев и с течением времени и вовсе превращаются в комментарии комментариев. В них много внимания уделяется бесконечному обсуждению сложностей, с которыми сталкивается интерпретация, причем зачастую на страницах приводятся аргументы, где философия науки становится важнее собственно физики».

Само собой, это ни в коей мере не должно принижать заслуги и гений Бора, однако при изложении собственных идей ему действительно недоставало ясности. Это привело к появлению множества интерпретаций его интерпретации... если вы понимаете, о чем я.

Впрочем, существует ряд общих идей, которые встречаются во всех многочисленных и порой противоречащих друг другу версиях копенгагенской интерпретации.

Прежде всего, она гласит, что мы не можем описать квантовую систему отдельно от измерительного аппарата. В отсутствие измерительного устройства спрашивать о состоянии системы бессмысленно, поскольку узнать что-либо о системе мы можем, только вынудив ее взаимодействовать с устройством, которое мы используем для наблюдения за ней.

Далее, наблюдатель играет важнейшую роль. Так как мы вольны выбирать, какое измерение провести (узнать положение или импульс частицы, направление поляризации фотона или спин электрона), нельзя сказать, что квантовая сущность вообще обладает этими определенными характеристиками, пока мы не установим за ней наблюдение. Она должна оставаться в суперпозиции, пока мы не решим, что хотим измерить. В этом отношении определенные свойства квантовой системы соотносятся с реальностью лишь непосредственно в момент измерения. До этого нельзя считать их даже существующими в классическом смысле, пока мы их не измерим. Реальны лишь результаты измерений!

Нужна ли теории интерпретация?

Представление о том, что научная теория вполне может иметь более одной интерпретации, при условии что их предсказания не различаются, вероятно, характерно лишь для квантовой механики. Сравнив эту ситуацию с другими выдающимися достижениями XX века, можно провести интересную параллель.

В 1905 году, всего через несколько месяцев после публикации статьи о фотоэлектрическом эффекте, за которую он впоследствии удостоился Нобелевской премии, Эйнштейн завершил свою самую знаменитую работу – специальную теорию относительности. Она гласила, что различные наблюдатели, движущиеся относительно друг друга, будут иметь разное представление о расстоянии и временных интервалах между двумя событиями. Так как никто не вправе претендовать на главенство собственной системы отсчета, представление об абсолютных длинах и временных интервалах пропадает. Это можно понять, только объединив идеи пространства и времени. Следовательно, два наблюдателя, движущихся на высокой скорости относительно друг друга, будут по-разному оценивать длину объекта. Это в некотором роде уравнивается тем, что измеренное их часами время между двумя событиями тоже будет разным.

Измеренные двумя наблюдателями расстояния между двумя точками и временные интервалы связаны друг с другом посредством набора алгебраических формул, называемых преобразованиями Лоренца по имени голландца Хендрика Лоренца, который первым записал их за год до публикации работы Эйнштейна. Значительная часть подготовительной работы к теории относительности действительно была проведена еще до Эйнштейна, и в 1890-х годах Лоренц и ирландский физик Джордж Фицджеральд независимо друг от друга предложили ранние формы этих преобразований, чтобы объяснить известный эксперимент, который показал, что свет может проходить сквозь пустое пространство.

Проблема состояла в том, что уравнения Лоренца и Фицджеральда были абсолютно правильными и давали верный ответ, но по неверной причине. Ученые неправильно истолковали происходящее, предположив, что измеряющий скорость света прибор оказывался растянутым в длину из-за своего движения сквозь таинственный «эфир», заполняющий все пространство. Великое достижение Эйнштейна заключалось в том, что он предложил простой постулат, с помощью которого смог дать верную интерпретацию физики. Он показал, что для распространения свету вовсе не нужен носитель – как в случае с водой и водяными волнами. Все встало на места, когда он смело предположил, что пучок света не только может проходить сквозь пустое пространство, но и обладает одинаковой скоростью, независимо оттого, как быстро мы двигаемся относительно него в момент проведения измерений.

В эту идею трудно поверить, но она чрезвычайно важна. Последовавшие за ней предположения, в частности о единстве пространства и времени, позволили нам объяснить получаемые экспериментальные результаты.

Таким образом, сжатие Лоренца – Фицджеральда оказалось верным – рассчитанные ими величины сошлись с результатами наблюдений, однако не по той причине, по которой они

полагали. Эйнштейн дал верную интерпретацию. Мы ясно видим, что хорошая интерпретация ценна тем, что она подводит нас ближе к истине. Без удовлетворительной интерпретации мы до сих пор бродили бы в темноте, как бы хорошо наша теория не соотносилась с экспериментальной практикой.

Никто не смог предложить единственную и полностью удовлетворительную интерпретацию квантовой механики. Но означает ли это, что такой «верной» интерпретации не существует вовсе?

Еще одна идея копенгагенской интерпретации заключается в том, что должно существовать четкое разделение между измеряемой (квантовой) системой и макроскопическим измерительным прибором (описываемым по законам ньютоновской, или классической, механики). Следовательно, хотя последний и состоит из атомов, нельзя считать, что он в равной степени подчиняется квантовым законам. Акт измерения приводит к резкому скачку в состоянии измеряемой системы, которая превращается из комбинации потенциальных параметров в итоговый результат. Идею «коллапса волновой функции», происходящего после измерения, впервые в 1929 году предложил Гейзенберг.

Неудивительно, что теория не поддается логическому пониманию, так как для объяснения квантовой механики требуется прибегать к отчаянным мерам. Вероятно, большего здесь и не сказать. Теперь мне стоит перечислить свои претензии к копенгагенскому подходу, чтобы вы поняли, почему я – как и многие другие физики – полагаю, что ее время прошло.

Я вообще не считаю копенгагенскую интерпретацию настоящей интерпретацией. Это набор правил, которым мы должны подчиняться, чтобы применять квантовый формализм, не задумываясь о его значении. Следовательно, копенгагенская интерпретация не только не объясняет, как атом проходит сквозь две прорези одновременно, но и категорически заявляет, что сам этот вопрос не имеет никакого смысла, а потому нам стоит ограничить свои комментарии картиной интерференции на экране (то есть измерением). Копенгагенская интерпретация успешно устраняет логические противоречия и нестыковки, позволяя задавать лишь те вопросы, которые касаются результатов измерений.

Многие из тех, кто стоял у истоков копенгагенской интерпретации, в частности Бор, Гейзенберг и Вольфганг Паули, с некоторым презрением относились к последующим попыткам формирования физической картины квантового мира. Они считали их тщетной попыткой вернуться к устаревшему (ньютонианскому) способу мышления, который навсегда отошел в прошлое. Впоследствии Бор действительно даже отказывался смотреть на альтернативные интерпретации, вероятно, надеясь, что они просто пропадут сами собой. Гейзенберг тоже не принимал эти варианты, поскольку:

«они лишь повторяют копенгагенскую интерпретацию другими словами [и] формируют исключительно позитивистскую точку зрения, что кто-то может сказать, будто мы тут изучаем не контрпроекты для копенгагенской интерпретации, а лишь заботимся о ее точном повторении на другом языке»^[40].

Он полагал, что формализм квантовой механики предопределяет существование лишь одной интерпретации, в то время как альтернативные подходы отличаются от нее одним только способом интерпретации математики, но не задействуют никакой другой физики. Не стоит и говорить, что я с ним не согласен, ведь таким взглядом может обладать лишь приверженец копенгагенской школы позитивизма!

Мое второе критическое замечание связано с тем, что копенгагенская интерпретация ничего не говорит о том, как происходит коллапс волновой функции. Время странным образом делится на периоды до и после измерения, которое проводится в отношении квантовой

системы. Прежде чем мы установим наблюдение, оно развивается в соответствии с уравнением Шрёдингера. Это развитие – изменение волновой функции с течением времени – не предполагает ни неопределенности, ни вероятностей. Но, как только происходит измерение, нам приходится следовать совершенно другому набору правил, в связи с чем в дело вступают квантовые вероятности. Копенгагенская интерпретация не может и даже не пытается объяснить это различие между обычным физическим процессом и процессом измерения.

Наконец – и это, как мне кажется, самое важное, – наделяя наблюдателя таким привилегированным статусом, копенгагенская интерпретация отрицает наличие объективной реальности, которая существует в отсутствие наблюдения. Сторонники копенгагенского подхода часто обвиняют тех, кто до сих пор ищет интерпретации квантового формализма, в том, что они потерялись в метафизике, забыв об истинной физике. Однако, если «верная» интерпретация квантовой механики действительно существует, ее поиск представляет собой попытку объяснить, как на самом деле ведет себя природа. В то же время довольствоваться набором узкоспециальных правил, которым следует подчиняться, чтобы проводить вычисления, можно лишь временно.

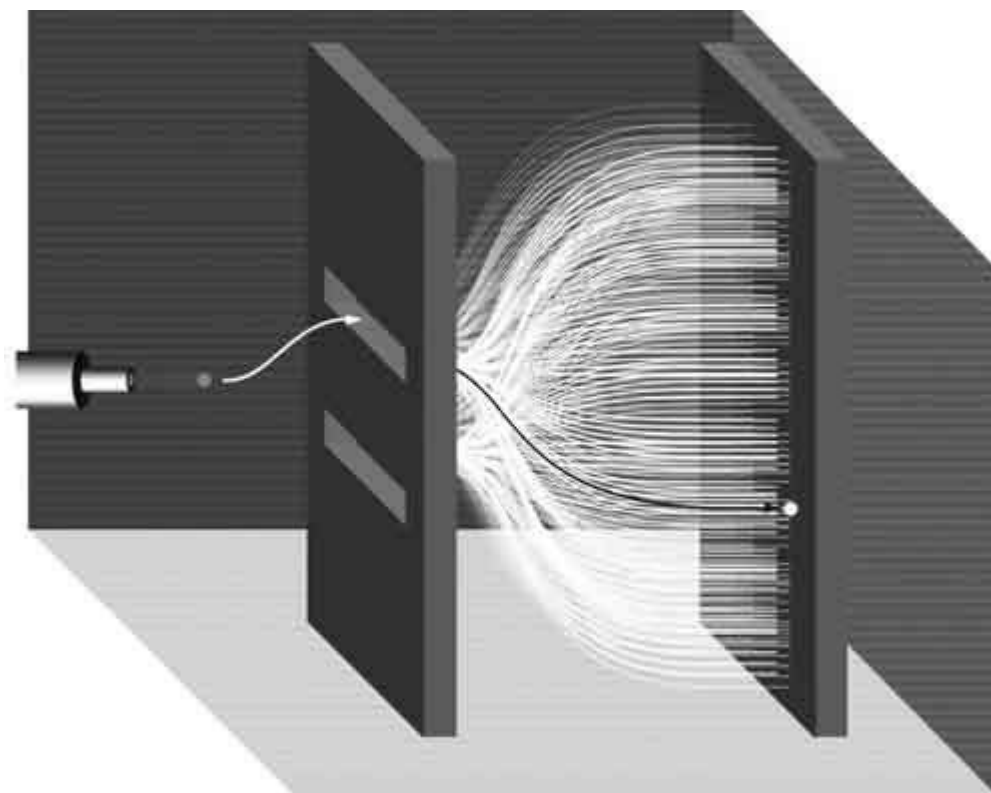
Что же еще есть на рынке? И, если другие интерпретации в состоянии дать более рациональное и убедительное объяснение, почему большинство физиков по-прежнему предпочитают копенгагенский подход?

Интерпретация де Бройля – Бома

Нескольких отцов-основателей квантовой механики не устроило копенгагенское объяснение, которое они сочли лишь превалирующей догмой. С самого начала Эйнштейн, Шрёдингер и де Бройль изо всех сил пытались предложить встречные варианты интерпретации квантовой механики, но они не могли тягаться с талантом, напором и даром убеждения копенгагенской группы. Есть целый ряд свидетельств множества профессиональных споров Бора и Эйнштейна о смысле всего этого, и общепризнанно, что победил в этой дискуссии Бор. Однако это произошло лишь потому, что Эйнштейн настаивал на устранении всей квантовой странности. Теперь мы знаем, что это невозможно, но это не означает, что Бор был прав!

На самом деле первую серьезную альтернативу копенгагенской интерпретации предложил Луи де Бройль. Он назвал свой подход «принципом двойного решения», намекая на предложенный им синтез волнового и корпускулярного аспектов материи. Одной из ключевых вех в развитии квантовой механики стал состоявшийся в 1927 году в Брюсселе Сольвеевский конгресс. Считается, что никогда прежде столь многое не прояснялось таким малым количеством ученых за столь короткое время. На конгрессе присутствовали все ведущие физики-теоретики того времени, включая Эйнштейна и Бора.

Де Бройль представил статью, в которой предположил, что волновая функция на самом деле может соответствовать реальной физической волне, которая направляет реальные квантовые частицы по определенным путям. У него не было времени должным образом выстроить все свои идеи, так что он не смог защитить их от серьезной критики ряда делегатов. Дело в том, что с момента опубликования Гейзенбергом матричной механики прошло всего два года, и копенгагенский кружок полностью отвергал любой подход, в котором прослеживалась попытка вернуться к «реализму», называя его слишком наглядным, а потому неверным в квантовом мире.



Объяснение де Бройля – Бома: атом остается локализованной классической частицей, а следовательно, проходит только сквозь одну из прорезей. Однако влияние квантового потенциала распространяется на обе прорези и направляет атом по определенному, но неконтролируемому и непредсказуемому пути, вытравленному картиной его распределения.

Четверть века спустя оказалось, что их подход был опрометчивым и чересчур догматичным.

Американский физик Дэвид Бом, который поселился в Англии, после того как ему пришлось уволиться из Принстона из-за подозрений в антиамериканской деятельности в эпоху маккартизма, с успехом выполнил то, что многим представлялось невозможным. В 1952 году он опубликовал две статьи, которые, в сущности, представляли собой развитие оригинальной идеи де Бройля. В этих работах он показал, что копенгагенская интерпретация не единственная совпадала с результатами экспериментов.

Важно подчеркнуть, что интерпретация Бома не подразумевает никаких дополнений к уравнениям квантовой механики. Людям не понравилась не сама теория – не математический аппарат, с помощью которого мы рассчитываем физические свойства квантовых систем, – а ее значение. Так что, прежде чем подробнее остановиться на идее Бома, я еще раз хочу обратить ваше внимание на то, что две этих интерпретации (копенгагенская и де Бройля – Бома, хотя де Бройль и не получил за нее заслуженного признания) не делают никаких иных измеримых предсказаний о субатомном мире. Это просто невозможно, раз они используют одну и ту же теорию. Они дают нам лишь два очень разных взгляда на происходящее в эксперименте с двумя прорезями. Следовательно, они различаются лежащей в их основе физикой, а не языком, используемым для описания формализма.

Бом предположил, что волновая функция представляет собой не просто математическую величину, а реальную физическую сущность. Следуя старой идее де Бройля, он преобразовал уравнение Шрёдингера таким образом, чтобы оно дало картину определенных частиц, направляемых своеобразным силовым полем.

Сторонники подхода де Бройля – Бома утверждают, что таким образом мы возвращаем себе не что иное, как саму реальность. Мы снова оказываемся вправе задать вопрос, что на самом деле происходит, когда атом встречается на своем пути две прорези. Может, нам и не нравится, что мы получаем, а некоторые физики даже используют это в качестве повода для критики этой интерпретации, поскольку квантовая странность – такая как уже знакомая нам нелокальная природа волновой функции – более не скрывается под удобной математикой и оказывается «прямо у нас под носом». Бом позволяет нам задавать вопросы о том, как ведет себя природа в отсутствие наблюдения. Многим физикам это кажется бесполезным, поскольку мы не в силах выяснить истину, пока не установим наблюдение, поэтому нам достаточно и минималистской копенгагенской интерпретации, которая затрагивает только результаты измерений.

Как же интерпретация де Бройля – Бома объясняет фокус с двумя прорезями? Она утверждает, что часть информации, заключенной в волновой функции Шрёдингера, описывает форму квантовой энергии, называемую квантовым потенциалом, которая распространяется в пространстве и направляет квантовые частицы по определенным путям. В связи с этим, хотя сам по себе атом проходит только сквозь одну из прорезей, квантовый потенциал охватывает обе. Возникающая на экране картина интерференции образуется в результате того, как квантовый потенциал ведет себя по другую сторону прорезей. Можно сказать, что форма квантового потенциала заставляет каждый атом двигаться по определенному, но непредсказуемому пути. Истинная форма квантового потенциала выясняется лишь после прохождения множества атомов и представляет собой картину их попаданий на задний экран.

Когда мы пытаемся следить за атомами, картина интерференции пропадает, поскольку мы оказываем влияние на квантовый потенциал. Точно так же закрытие одной из прорезей изменяет квантовый потенциал повсюду и вызывает изменение возможных траекторий атомов, проходящих сквозь другую прорезь.

Нарушение квантового потенциала в одном месте мгновенно преобразует его во всем пространстве! Хотя эту нелокальность нельзя использовать для передачи сигналов на скорости выше скорости света из-за неотъемлемой непредсказуемости ее влияния на каждую конкретную частицу, которую направляет квантовый потенциал, именно этот аспект подхода де Бройля – Бома многие находят неприятным.

Однако не стоит забывать, что квантовая механика нелокальна, какую бы интерпретацию мы ни выбрали. Дело лишь в том, что в копенгагенской интерпретации нелокальность считается очередным математическим свойством волновой функции, а следовательно, обречена на «нереальность». Ценой этому становится то, что определенные параметры атома тоже считаются нереальными (конечно, до проведения измерений). Физик Джон Белл, который был ярким сторонником идей Бома, всегда утверждал, что он охотнее распрощается с локальностью, чем с реальностью как таковой!

В интерпретации де Бройля – Бома нам больше не приходится думать о том, что атомы распространяются и проходят сквозь две прорези одновременно. Вместо этого они всегда предстают определенными, локализованными частицами. Но важно заметить, что мы можем лишь рассчитать вероятность обнаружения атома в определенном месте, используя волновую функцию точно так же, как раньше. Поэтому, несмотря на то что этот подход восстанавливает старую идею природного детерминизма, он не являет собой возвращение к ньютоновской механической вселенной. Мы в принципе не можем контролировать изначальные условия конкретной частицы, чтобы получить возможность предсказывать ее определенную траекторию, потому что любая подобная попытка приведет к изменению квантового потенциала. Иными словами, мы не можем заранее знать, сквозь какую из прорезей пройдет атом.

Кроме того, хотя эта интерпретация и гласит, что каждая частица следует реальной, определенной траектории, мы не можем этого доказать.

Так почему интерпретация де Бройля – Бома не получила широкого распространения? Ее сторонники по-прежнему составляют меньшинство среди физиков. Обычно ее обвиняют в том, что она работает только потому, что в ее основе лежит та же самая математическая теория, которая стала фундаментом копенгагенской интерпретации. Все остальное не имеет экспериментального смысла и основывается лишь на классическом предрассудке. Но даже сам Гейзенберг не смог раскритиковать ее сильнее, чем сказать, что она является «метафизической» и «идеологической».

Другие физики считают, что нет никакой необходимости в дополнительных комментариях о существовании квантового потенциала, и недовольны весьма заметной нелокальностью этой интерпретации. Например, в ЭПР-эксперименте, который я описывал в Главе 4, одна из двух частиц мгновенно оказывает влияние на свою далекую частицу-партнера посредством их объединенного квантового потенциала. Но Эйнштейн доказал, что коммуникация со скоростью выше скорости света невозможна. Так что, если квантовый потенциал действительно существует, квантовая механика должна вступать в противоречие с теорией относительности. Однако, как уже упоминалось ранее, на практике все не так плохо – даже если квантовый потенциал и существует, передачу сигналов на сверхсветовой скорости невозможно использовать для отправки сообщений из-за присущей отдельным квантовым измерениям вероятностной (то есть непредсказуемой) природы.

Возможно, на самом деле эта версия квантовой механики не стала стандартной исключительно в силу исторических причин. Так полагал американский физик Джим Кушинг, который утверждал, что копенгагенский подход до сих пор считается стандартным, потому что он появился первым и имел более влиятельных сторонников. В 1920-х годах его оппоненты (Эйнштейн, Шрёдингер и де Бройль) не были едины в своей критике. В связи с этим, как написал Кушинг^[41].

«копенгагенская интерпретация первой появилась на горизонте, и большинству практикующих физиков не было смысла ее вытеснять».

На самом деле теория Бома относится к классу интерпретаций, которые называют теориями «скрытых параметров», и представляет собой самый замысловатый из этих подходов. Упомянутые скрытые параметры связаны с более глубоким уровнем физической реальности, который скрыт от нас, но при этом таит в себе истоки квантовой неопределенности и неясности. В интерпретации де Бройля – Бома скрытыми параметрами являются определенные положения частиц. Следовательно, она отличается от копенгагенской интерпретации, так как утверждает, что квантовая частица обладает определенным положением и импульсом и до проведения измерений, но мы не можем получить доступ к значению этих величин. В таком случае принцип неопределенности становится лишь констатацией нашего неизбежного невежества.

В 1932 году математик Джон фон Нейман, казалось бы, предоставил математическое доказательство, которое ликвидировало возможность рассмотрения теорий скрытых параметров и поддерживало копенгагенскую точку зрения о том, что определенные свойства квантовых объектов нельзя считать существующими, пока мы их не измерим. Только много лет спустя физики обнаружили, что «доказательство» фон Неймана было неверным^[42]. Если допустить существование нелокальности, нет никаких причин отказываться от основанной на объективной реальности интерпретации вроде теории Бома. Попытки устранить все теории скрытых параметров называются «доказательствами невозможности». Джон Белл утверждал, что «доказательствами невозможности доказывается лишь недостаток воображения». В последние годы, однако, физик Дэвид Мермин, который внес значительный

вклад в развитие идей Белла, ответил на это, сказав, что «доказательствами возможного доказывается лишь переизбыток воображения».

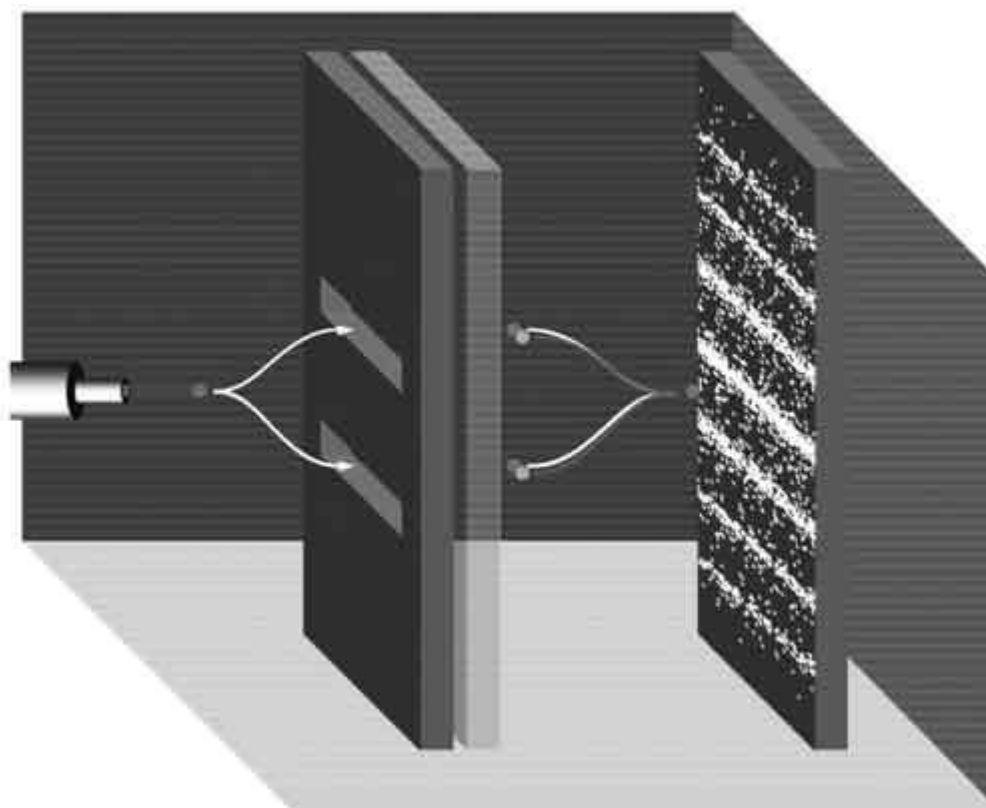
Многомировая интерпретация

Через несколько лет после Боба другой американец по имени Хью Эверетт III предложил теорию, которую сам назвал «интерпретацией относительного состояния» (звучит довольно безобидно, правда?). Впоследствии ее стали считать самой диковинной и экстравагантной интерпретацией квантовой механики и в то же время самой прямолинейной ее интерпретацией, в зависимости от того, как посмотреть. На самом деле я и сам колеблюсь между двумя крайностями, то поражаясь, как кто-либо вообще может быть настолько глупым, чтобы уделять ей хоть толику внимания, то гадая, как, будучи в своем уме, вообще можно искать ей хоть какую-то альтернативу.

Интерпретация Эверетта, как и интерпретация де Бройля – Боба, свободна от проблемы измерения, которая терзает копенгагенскую версию. В отличие от подхода Боба, она не требует и физической нелокальности. Хотя декогеренция довольно успешно вписывается в две первых интерпретации, в подходе Эверетта и его современных вариантах она, как кажется (по крайней мере, мне), чувствует себя как дома. Что ж, пока все хорошо. Но не забывайте, что квантовая странность все равно должна хоть как-то себя проявить. Здесь она заключается в невероятном условии: мы должны жить в одной из бесконечного числа параллельных вселенных!

Что может вести к такому выводу? Такое впечатление, что чем более странной кажется формулировка интерпретации квантовой механики, тем больше у нее шансов на успех! Может, где-то своего часа ждет и другая интерпретация, в которой вся странность устраняется требованием допустить передачу сигналов в прошлое при проведении квантового измерения? Так, погодите-ка, ее уже открыли! Она называется транзакционной интерпретацией, и ближе к концу этой главы я скажу о ней пару слов. Но теперь вы понимаете, к чему я клоню. Псевдонаучные теории эпохи нью-эйдж, включая рассказы о мистической силе кристаллов и пирамид, меркнут в сравнении со столь разными, но в равной степени серьезными взглядами на то, как именно природа вершит свои дела на микроуровне.

Но вернемся к Эверетту. За годы его интерпретация приобрела целый ряд вариантов. Его оригинальная идея теперь называется многомировой интерпретацией, но существуют также интерпретация мультивселенной, интерпретация множественных историй и интерпретация множественных разумов. Первая мне нравится, вторую я не очень понимаю, а третья совсем не по мне.



Многомировое объяснение: существуют все возможные реальности. В каждой вселенной атом проходит сквозь свою прорезь, и две вселенные накладываются друг на друга только на уровне отдельного атома. В каждой вселенной атом чувствует присутствие своего параллельного двойника, который прошел сквозь другую прорезь. Суперпозиция, а следовательно, и интерференция, становятся результатом суперпозиции вселенных.

Основная идея заключается в следующем: когда квантовая система сталкивается с выбором, к примеру, когда частица проходит сквозь одну из двух или более прорезей, мы считаем, что не волновая функция оказывается в суперпозиции, а вся Вселенная вместе с ней расщепляется на несколько реальностей, количество которых равняется количеству возможных вариантов. Эти различные миры/вселенные/ветви идентичны друг другу и различаются только тем, какой вариант выбирает частица: в одной вселенной она проходит сквозь верхнюю прорезь, в другой – сквозь нижнюю. Вселенные накладываются друг на друга только в той области, где происходит интерференция, пока в дело не вступает декогеренция. Она заставляет их разделиться на независимые и не взаимодействующие друг с другом реальности. Вот и все. Процессы измерения больше нет, как нет и нужды в коллапсе волновой функции. Кот Шрёдингера оказывается мертвым в одной вселенной и живым – в другой. Будучи наблюдателями, мы тоже расщепляемся и видим лишь исход одной ветви. Но в параллельных вселенных остаются наши копии, которые наблюдают альтернативные исходы.

Хью Эверетт был разочарован и раздосадован недостатком поддержки его взглядов со стороны других физиков – и действительно, есть сведения, что, когда Эверетт посетил Бора в Копенгагене, тот лишь отмахнулся от него. Он ушел из физики и стал сначала специалистом по анализу оборонных проблем, а затем частным подрядчиком американской оборонной промышленности, в процессе чего и сколотил состояние, рассчитывая, как максимизировать количество жертв во время ядерной войны. Мило. Интерес к его работе в конце 1960-х годов снова проявил Брайс Девитт, который и ввел термин «многомировая интерпретация».

Оксфордский физик Дэвид Дойч, один из отцов-основателей сферы квантовых вычислений, предложил вариацию идеи Эверетта, в которой все возможные вселенные уже существуют, а потому им не нужно ждать встречи с квантовым выбором, чтобы расщепиться на части. Дойч также разработал тест собственной интерпретации, который требует разработки искусственного интеллекта. В ходе теста планируется проверить, имеет ли в таком случае место коллапс волновой функции, поскольку в многомировой интерпретации он не происходит.

Что еще есть на рынке?

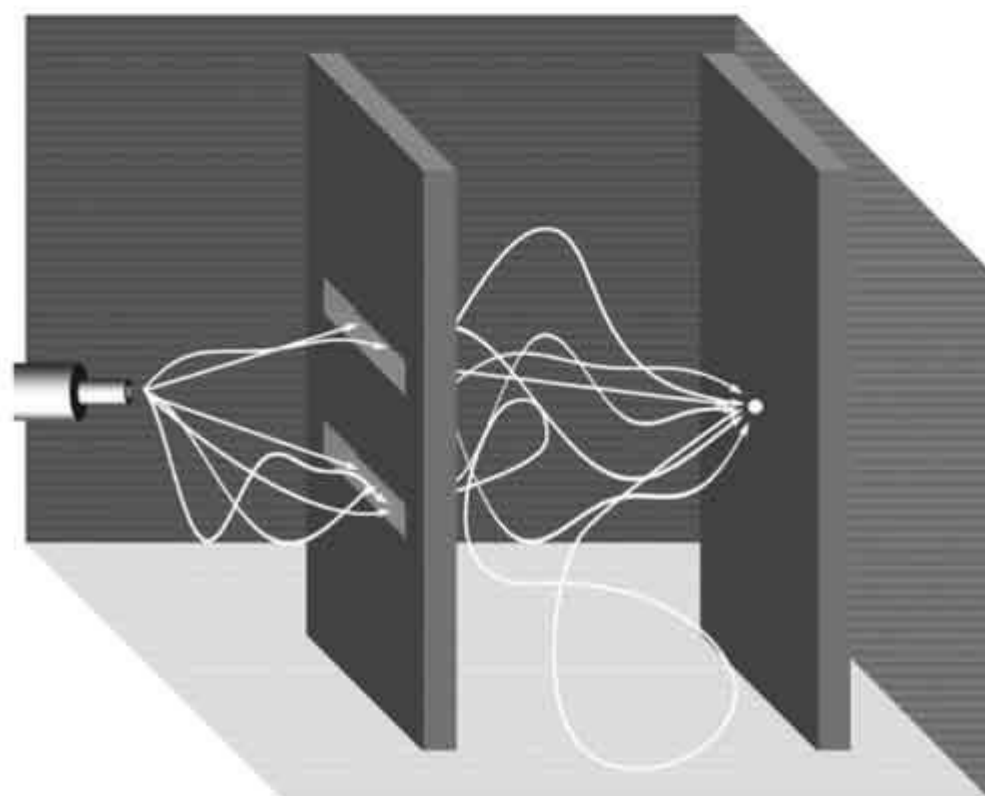
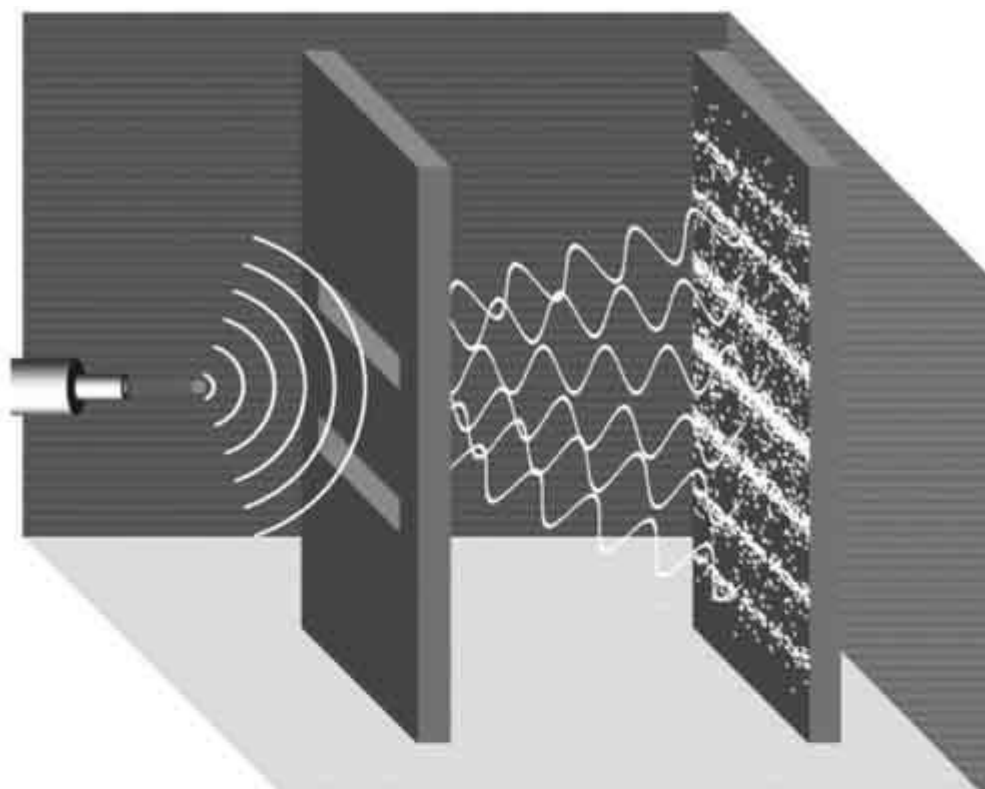
С течением времени многие интерпретации дискредитировались или отбрасывались либо из-за крайне малой вероятности их верности, либо из-за получения новых, опровергающих их результатов экспериментов. К примеру, родственники подхода де Бройля – Бома, известные под общим названием теории локального реализма, оказались вычеркнуты из списка после проведения Аленом Аспе в начале 1980-х годов эксперимента, который подтвердил нарушение неравенства Белла (описанного в Главе 4). Точно так же сегодня вряд ли хоть кто-то всерьез считает, что для коллапса волновой функции необходимо сознание.

Среди ранних теорий выделялась статистическая интерпретация – что интересно, именно ее предпочитал Эйнштейн, – которая гласит, что квантовая механика дает информацию только о целом наборе измерений (идентичных квантовых систем), а не об одном отдельном измерении. Отсюда и отсылка к общей «статистике». Так как теперь эксперименты можно проводить на отдельных системах и даже на отдельных атомах, чтобы выжить, этой интерпретации требуются серьезные комментарии от небольшой группы ее последователей.

Недавно в списке интерпретаций появилось еще два пункта – транзакционная интерпретация и интерпретация последовательных историй. Первая, предложенная Джоном Крамером, своей значительной нелокальностью напоминает подход де Бройля – Бома. На самом деле нелокальность здесь даже более сильна: требуются не просто мгновенные коммуникации в пространстве, но коммуникации во времени! Открытие коробки с котом Шрёдингера отправляет в прошлое сигнал, который велит радиоактивному ядру распасться или не распасться.

Подход последовательных историй, который в основном обязан своим появлением изучающему частицы физику, лауреату Нобелевской премии Марри Гелл-Ману и его коллеге Джеймсу Хартлу, еще не получил широкого распространения, но уже привлек достаточно большое количество сторонников. Эта интерпретация сочетает волновые функции и вероятности последовательным образом, который не требует проведения измерений. Впервые эту трактовку в 1984 году предложил Роберт Гриффитс, а через несколько лет ее развил Роланд Омне. В соответствии с этой точкой зрения, «история» определяется как цепочка квантовых событий, последовательных во времени. Этот подход удачен тем, что он позволяет нам определять вероятности различных событий – к примеру, вероятность распада радиоактивного атома в конкретный момент времени, – даже если они происходят далеко в космосе, вдали от всех измерительных приборов.

Мне также стоит упомянуть, что существует несколько интерпретаций, основанных на теории динамической редукции^[43]. Эти подходы требуют некоторого дополнения, которое время от времени приводит к самостоятельному спонтанному коллапсу волновой функции (в отсутствие измерений). Хотя теорию можно согласовать со всеми известными наблюдениями, реальный физический механизм, вызывающий этот коллапс, пока неизвестен. Эксперименты ближайшего будущего проверят, происходит ли это на самом деле. Если это так, то квантовую механику потребуются модифицировать. Большинство физиков сходятся во мнении, что вероятность этого крайне мала.



Вверху: Транзакционное объяснение. Хотя эта интерпретация не помогает объяснить главную загадку, как атом проходит сквозь обе прорези одновременно, она делает попытку объяснить, как атом еще до прохождения сквозь прорези знает, наблюдают ли за ним. Достигая экрана или детектора, установленного возле одной из прорезей, атом посылает в прошлое сигнал, который определяет поведение приближающейся волны, веля ей либо проходить сквозь обе прорези и интерферировать, либо проходить лишь сквозь одну из прорезей.

Внизу: Объяснение суммы историй. Атом остается частицей, но одновременно изучает все возможные пути, какими бы невероятными они ни были. Сложенные вместе, все пути исключают друг друга, оставляя лишь один физический путь, по которому и следует атом. Но то, как именно пути исключают друг друга, зависит от количества вариантов; если обе прорези открыты, возможных путей больше, поэтому их исключение происходит иначе.

Где мы сейчас?

Проблемы интерпретации квантовой механики вышли на первый план серьезной науки лишь в последние пару десятилетий. Отчасти это объясняется проведением новой серии невероятно сложных и инновационных экспериментов в сфере атомной физики и оптики, а также выдающейся работы в новых областях квантовой криптографии и квантовых вычислений. Во многих исследованиях физики манипулируют отдельными атомами!

Будучи студентом, я и не подозревал о проблемах интерпретаций. Хотя тема этой главы лишь сбивает студентов с толку и отвлекает их от проведения полезных и важных расчетов и измерений, кажется, что обсуждение этих вопросов до недавнего времени считалось табу. Марри Гелл-Ман выразился так:

«Нильс Бор промыл мозги целому поколению физиков, заставив всех поверить, что проблема уже решена».

А по словам самого Бора:

«нет никакого квантового мира. Есть лишь абстрактное квантовофизическое описание. Ошибка – думать, что задача физиков заключается в том, чтобы выяснить, какова наша природа. Физики думают [лишь] о том, что мы можем сказать о природе».

Я не согласен. По крайней мере, здесь я чувствую, что Эйнштейн был прав. Он полагал, что задача физических теорий заключается в «как можно более правдивом описании истинной физической реальности». Так что я предпочитаю в духе «Секретных материалов» считать, что «истина где-то рядом». Я не знаю, сумеем ли мы когда-либо ее постичь, однако не сомневаюсь, что наши поиски не окажутся тщетными. Одно то, что формализм квантовой механики дает нам роскошь обладания сразу несколькими интерпретациями, из которых мы (пока) не можем выбрать верную, не означает, что верной интерпретации не существует. Само собой, мы можем ее никогда не найти, однако было бы слишком самонадеянно с нашей стороны полагать, что, раз мы не можем сделать выбор, его не может сделать и природа.

Квантовая реальность с позиции де Бройля и Бома

Крис Дьюдни. Школа наук о земле и окружающей среде, Портсмутский университет

Хотя интерпретацию де Бройля – Бома и нельзя назвать самой популярной среди физиков, существует несколько ее вариантов. Общим знаменателем различных подходов становится тот факт, что частицы обладают определенным положением, которое разворачивается в соответствии с детерминистскими уравнениями движения. Зная некоторые изначальные положения всех частиц в системе (не забывайте, это нельзя контролировать – см. основной текст) и принцип изменения волновой функции с течением времени, можно точно рассчитать, как будут двигаться частицы. Таким образом, все будущее (и прошлое) системы, включая результаты любых проводимых измерений, становится предсказуемым. В этом отношении квантовая механика ничуть не более загадочна, чем классическая. Подходы различаются лишь нашим взглядом на то, как именно определяются траектории.

Изначально Бом заявил о существовании нового типа силы, происходящей из квантового потенциала и направляющей частицы в верные места, тем самым объясняя разницу между квантовым и классическим поведением. Бому хотелось на контрасте показать существенные различия между квантовым и классическим миром. Остальные приняли версию Джона Белла и заявили, что нам нужно лишь уравнение, которое определяет траектории (и которое само по себе следует считать новым типом закона природы), и что нам следует воздержаться от разговоров о квантовых потенциалах и квантовых силах, которые, к несчастью, облачают теорию в жуткую ньютоновскую форму. Одна из проблем, которые, возможно, в прошлом помешали принятию интерпретации де Бройля – Бома, заключается в том, что вручную эти траектории можно рассчитать лишь в самых простых и неинтересных случаях. Однако с конца 1970-х годов было проведено множество точных вычислений, начиная с эксперимента с двумя прорезями, которые ясно показывают, как именно работает этот подход.

Как в 1952 году заметил Бом, для интерпретации де Бройля – Бома характерна одна интересная черта: хотя основная теория и воспроизводит все ожидаемые результаты, варианты также возможны – они появляются при ослаблении некоторых допущений интерпретации, которые дают новые наблюдаемые эффекты. В настоящее время ведется работа по определению обстоятельств, в которых эти эффекты могут быть распознаны.

Одной из наиболее фундаментальных черт квантовой механики, которую обнажает интерпретация де Бройля – Бома, является нелокальность. Нелокальность представляет собой связанность отдельных систем в обстоятельствах, при которых, в соответствии с теорией относительности, между ними невозможно никакое физическое взаимодействие. Согласно теории относительности, все коммуникации должны происходить на скорости, которая меньше или равна скорости света, однако нелокальность нарушает это условие. Сегодня одним из самых интересных вопросов теории де Бройля – Бома можно назвать проблему согласования явной нелокальности с теорией относительности. Считается, что никакие возможные в квантовых системах измерения не могут обнажить конфликт с относительностью, наглядно продемонстрировав сверхсветовое взаимодействие: мы не можем использовать квантовую механику для передачи сигналов на скорости выше скорости света. Также считается, что любая реалистическая интерпретация квантовой механики должна включать в себя нелокальные процессы. Бом утверждал, что, даже несмотря на то что его интерпретация дает статистические результаты квантовой теории, которые, как известно, согласуются с теорией относительности, на фундаментальном уровне отдельных процессов (которые объясняют эти результаты) дух относительности все же нарушается. Следовательно, должно допускаться сверхсветовое взаимодействие. Более того, Бом утверждал, что вопреки основному принципу теории относительности существует специальная, или предпочитаемая, система отсчета, в которой взаимодействие происходит мгновенно. Многие физики не могут смириться с этим отходом от теории относительности даже на уровне скрытых процессов и считают это поводом не согласиться с подходом Бома. Проводились даже эксперименты с целью выяснить, какое условие эксперимента фиксирует предпочитаемую систему отсчета, в которой взаимодействия происходят мгновенно. Но помимо подхода Бома существуют и другие варианты.

В последнее время был сделан целый ряд различных предложений, показывающих, как можно расширить интерпретацию де Бройля – Бома, не прибегая к введению предпочтительной системы отсчета, а закладывая нелокальность в насквозь релятивистский подход. Эта работа показывает, что основную критику теории де Бройля – Бома, заключающуюся в том, что она противоречит теории относительности, можно свести на нет. Само собой, дел еще много, особенно в отношении процессов, описываемых релятивистской теорией квантового поля. Однако суть в том, что однозначного аргумента против интерпретации де Бройля – Бома не существует, а все замечания к подходу объясняются предрасположенностью к конкретным идеям в противовес другим.

Глава 7. Субатомный мир

Дочитав до этого места, вы, возможно, решили, что квантовые физики все время обсуждают природу реальности, спорят о таких глубоких и важных вопросах, как определение слов «событие» и «явление», или что означает провести измерение, или придумывают все более и более изобретательные описания того, что может происходить (а может и не происходить) в микроскопическом мире, когда не установлено наблюдение. Это далеко от правды. Большинство физиков абсолютно не заботят проблемы интерпретации квантовой механики – и на то есть свои основания. Они слишком заняты, применяя теорию для понимания структуры и свойств субатомного мира.

И правда, не будь этого подхода «заткнись и считай», за последние полвека мы не сумели бы добиться в науке и технологии того прогресса, который я опишу в Главе 9.

Теперь, когда я закончил обзор вариантов, позволяющих нам раскрыть секрет фокуса с двумя прорезями, мы можем пойти дальше и узнать, как квантовая механика способствовала зарождению новых сфер научной мысли в поиске кирпичиков материи и как эти кирпичики взаимодействуют и комбинируются, чтобы сформировать восхитительно сложный мир вокруг нас. В течение последнего века физики копали все глубже и изучали все более мелкие сущности. Сперва они заглянули внутрь атома, затем внутрь атомного ядра, а затем – внутрь частиц, из которых состоит ядро. Поиск мельчайших элементов материи напоминал чистку лука. Снимая каждый следующий слой луковой кожуры, ученые обнаруживали под ним все более и более фундаментальные структуры. Таким образом, в этой главе содержится история развития атомной и ядерной физики, а также физики частиц и объясняется, как квантовая механика стала путеводной звездой в этой одиссее открытий. Само собой, отдать должное истории всех этих сфер в единственной главе просто невозможно, поэтому вас ждет лишь краткое знакомство с ней, в ходе которого мы время от времени будем ненадолго останавливаться, чтобы внимательнее рассмотреть особенно важные моменты и узнать о людях, во многом определивших физику XX века.

Более того, нам предстоит продолжить список квантовых странностей. Нас ждут еще несколько примечательных феноменов, включая квантовое туннелирование, спин и принцип исключения Паули.

Таинственные лучи повсюду

В Главе 2 я упомянул, что годы с 1895-го по 1897-й стали временем зарождения современной физики. Оглядываясь сегодня назад, можно также сказать, что эти несколько первых, волнующих лет можно точнее назвать «эпохой таинственных лучей». Лучи обнаруживались повсюду. На рубеже веков были открыты рентгеновские лучи, явление радиоактивности и электрон, и каждый из этих феноменов стал полной неожиданностью для научного сообщества^[44]. В течение последующего десятилетия их первооткрыватели – Вильгельм Рентген, Анри Беккерель и Джозеф (Дж. Дж.) Томсон соответственно – получили Нобелевские премии. Если помните, в Главе 2 мы проследили зарождение и развитие квантовой теории с революционной идеи Планка, высказанной в начале XX века. Однако в то время его работа была далеко не самой интересной и волнующей среди физических исследований. Внимание научного сообщества было приковано к открытию рентгеновских лучей. Эти невидимые лучи могли проходить сквозь твердое вещество и формировать изображение на фотографической пленке по другую сторону преграды. Столь удивительное свойство тут же завладело умами людей по всему миру, и очень скоро многие увидели его огромные преимущества для медицины и промышленности.

Вскоре после этого открытия Анри Беккерель, который также интересовался происхождением рентгеновских лучей, при изучении солей урана, окруженных

флуоресцентным сиянием, пришел к результатам, сходным с теми, которые получил в своем эксперименте Рентген. Беккерель обнаружил, что излучение урана тоже может проникать сквозь твердое вещество, такое как черная бумажная обертка, которую он использовал для защиты фотографической пленки от солнечного света, и оставлять на непроявленной пленке следы. Сначала он подумал, что при попадании на него солнечного света уран тоже излучает рентгеновские лучи, которые становятся частью его флуоресцентного сияния. Однако вскоре Беккерель понял, что излучение урана не имеет ничего общего ни с солнечным светом, ни с рентгеновскими лучами. Два года спустя Мария Кюри, которая также изучала таинственные лучи вместе со своим мужем Пьером, ввела понятие радиоактивности.

Тем временем один из гигантов экспериментальной физики англичанин Дж. Дж. Томсон открыл природу еще одних лучей. К тому моменту ученые уже много лет знали, что электрически заряженная металлическая пластина, помещенная в вакуумную трубку, испускает так называемый катодный луч. Но никто не понимал, из чего он состоит. Томсон продемонстрировал, что его составляют отрицательно заряженные частицы размером гораздо меньше атомов.

В некоторой степени подобно идее Планка о квантовании, но на целое десятилетие раньше, ирландец Джордж Стони выдвинул гипотезу, что электричество не непрерывно, а состоит из крошечных невидимых сгустков, которые он называл «электронами». Вскоре после открытия Томсона Лоренц предположил, что тот обнаружил электроны Стони. Хотя сначала Томсон возразил этому, именно он в итоге получил Нобелевскую премию за открытие электрона, первой элементарной частицы. Так часто случается с научными открытиями: Томсон не открыл катодные лучи и даже не дал им названия, но именно он получил Нобелевскую премию за то, что показал, из чего они состоят. Именно это открытие ознаменовало собой рождение субатомной физики.

Внутри атома

Так как же обстояли дела в начале прошлого века? Томсон предположил, что электроны представляют собой части внутреннего строения атомов. Но, так как они обладали отрицательным зарядом, а атомы были нейтральны, это подразумевало, что атомы также должны содержать положительный заряд, который бы нейтрализовал заряд электронов. В результате Томсон предложил первую экспериментальную модель атома, в которой электроны были равномерно распределены по сфере положительно заряженного атомного «вещества». Размеры сферы можно было примерно рассчитать на основании известных в то время величин. Эта модель получила название «пудинговой» модели атома, так как электроны в ней напоминали изюм в пудинге. В то же время Беккерель и супруги Кюри пришли к выводу, что определенные типы атомов излучают радиацию. Таким образом, пока одни физики и химики даже не верили в существование атомов, другие уже имели некоторое представление, из чего они состоят.

Родившемуся в Новой Зеландии Эрнесту Резерфорду было суждено стать одним из самых влиятельных ученых XX века. Он приехал в Кембридж, чтобы работать с Томсоном, и вскоре заинтересовался новым вопросом радиоактивности. Он открыл, что существует три типа радиоактивности. Первый, который он назвал бета-лучами, как оказалось, составляли электроны Томсона. Вторым, названным альфа-лучами, состоял из гораздо более тяжелых, положительно заряженных частиц, которые, как впоследствии продемонстрировал Резерфорд, оказались ионами гелия (атомами гелия без электронов). Он также показал, что третий, электрически нейтральный тип радиоактивности, открытый в 1900 году Полем Вилларом, представлял собой лишь форму электромагнитных лучей, подобных рентгеновским лучам^[45], которые он назвал гамма-лучами. Сегодня мы, конечно, называем типы альфа и бета частицами, а не лучами.

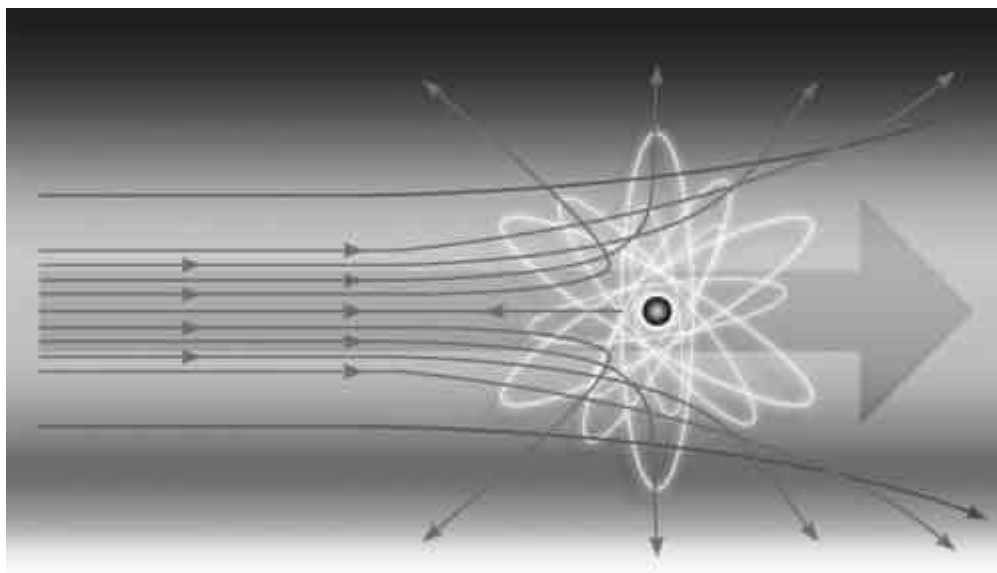
В течение первого десятилетия двадцатого века Резерфорд сумел доказать, что возраст земной коры составляет миллиарды лет. Он сделал это, измерив содержание гелия в образцах скальных пород, заключенная в которых урановая руда медленно испускала альфа-частицы с момента формирования скал. Каждая альфа-частица оказывалась в ловушке внутри камня и быстро приобретала пару электронов, чтобы стать атомом гелия. Сторонники теории креационизма до сих пор ничего не смогли противопоставить этому обнаруженному столетие назад простому и в то же время неопровержимому доказательству, что нашей планете больше миллиарда лет.

Через несколько лет Резерфорд стал первым ученым, исполнившим мечту алхимиков о трансмутации, когда провел эксперимент, в котором преобразовал один элемент в другой. Это не стало неожиданностью, так как к тому моменту Резерфорд совместно с Фредериком Содди пришел к выводу, что радиоактивный распад представляет собой естественную форму трансмутации.

Открыв альфа-частицы, Резерфорд быстро понял, что они дают необходимый инструмент для изучения атомной структуры. В 1911 году два его ассистента, Ханс Гейгер и Эрнест Марсден, провели серию трудоемких экспериментов, в которых пучок альфа-частиц, испускаемый радиоактивным источником направлялся на очень тонкую золотую фольгу. При столкновении с фоточувствительным экраном рассеивающиеся частицы обнаруживались благодаря крошечным вспышкам света. Несмотря на то что изначально толщина фольги составляла несколько тысяч атомов, большинство альфа-частиц проходило сквозь нее, практически не отклоняясь от своего курса. В связи с этим был сделан вывод, что атомы явно должны в основном состоять из пустоты. Более удивительным было то, что в среднем одна из восьми тысяч альфа-частиц отражалась от фольги. Если представлять атомы в соответствии с пудинговой моделью Томсона, это просто невозможно.

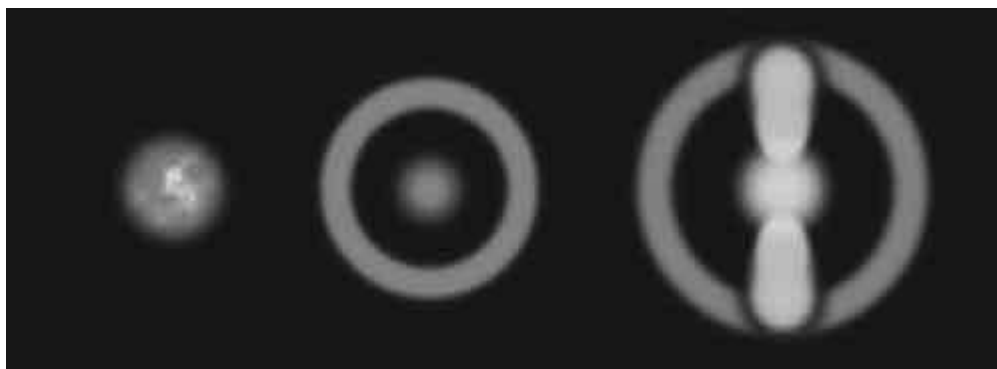
Резерфорд понял важность этого результата и предложил гораздо более удачную модель строения атома. Во-первых, он знал, что электроны в несколько тысяч раз легче альфа-частиц, а следовательно, не могут сбивать их с пути. Было похоже, что положительно заряженные альфа-частицы отклонялись электрическим сопротивлением положительного заряда внутри атома. Единственным способом объяснить наблюдаемое было предположить, что весь положительный заряд сконцентрирован в очень маленьком объеме для максимизации эффекта. Большинство альфа-частиц проходит мимо него, но некоторые оказываются достаточно близко, чтобы почувствовать всю силу положительного заряда атомов золота и отталкиваются от них.

Резерфорд назвал это крошечное скопление положительного заряда «ядром» атома и предложил новую модель атома. Она практически полностью состояла из пустого пространства, в центре которого находилось крошечное, положительно заряженное ядро, содержащее в себе почти всю атомную массу, а вокруг него по орбитам вращались еще более мелкие электроны.



В соответствии с теорией Резерфорда, чем ближе альфа-частица оказывается к лобовому столкновению с крошечным атомным ядром, тем больше угол отклонения. Результаты экспериментов Гейгера и Марсдена прекрасно подтвердили эту картину.

Именно в этот момент – в 1912 году – работать с Резерфордом начал молодой Нильс Бор, который первым применил квантовую теорию Планка к планетарной модели, чтобы объяснить ее стабильность (я описывал это в Главе 2). Но не забывайте, что до появления полноценной квантовой механики оставалось еще целое десятилетие. В модели Бора электроны по-прежнему считались крошечными «классическими» частицами, вращающимися вокруг ядра по фиксированным орбитам. Случившиеся в 1920-х годах открытия ученых вроде Гейзенберга и Шрёдингера показали, что такая картина атома не только наивна, но и во многом неверна. Они продемонстрировали, что квантовые законы, которым, по мнению Бора, должны были подчиняться электроны, вернее было связывать с волновыми функциями электронов. Путем решения уравнения Шрёдингера физики могли объяснить, как электроны располагаются в атоме. Только задним умом стало понятно, что выведенная для конкретного случая формула Бора на самом деле возникает из полной квантовой механики. Различие теперь заключалось в том, что отдельные электроны уже нельзя было считать локализованными частицами, вращающимися по орбите вокруг ядра; их стоило описывать с помощью волновой функции, содержащей в себе некоторые ярлыки, называемые квантовыми числами, которые определяют энергию электрона и траекторию его движения вокруг атома. Волновые функции электронов занимают весь объем атома и дают нам вероятностное распределение, которое показывает, где можно с высокой вероятностью обнаружить электрон, если мы «посмотрим туда». Возможно, вам встречались фразы «электронное облако» или «вероятностная плотность» электрона. Они просто означают трехмерный рисунок вероятности, который со временем не меняется, если только электрон не переходит из одного квантового состояния в другое (что равносильно старому представлению о «перепрыгивании» электрона с одной фиксированной орбиты на другую) при потере или получении кванта энергии или момента импульса^[46]. Любое такое изменение приведет к изменению волновой функции электрона и формы соответствующего вероятностного распределения.

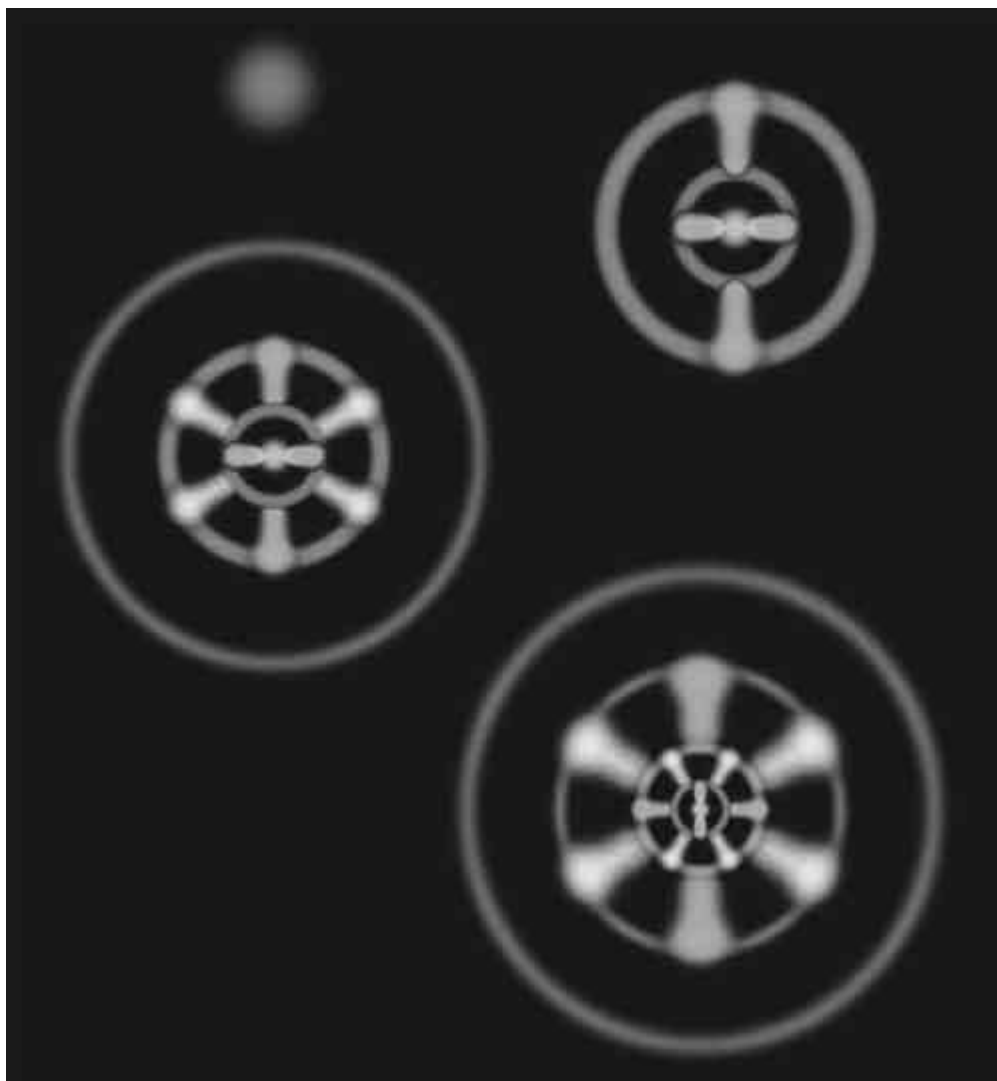


Вероятностные облака электронов в разрезе.

Слева: В атоме водорода единственный электрон находится в низшем энергетическом состоянии и с наибольшей вероятностью может быть обнаружен рядом с центром атома.

В центре: При возбуждении электрона в атоме водорода и его переходе на следующий энергетический уровень его облако внезапно изменяется. Теперь он с малой вероятностью может быть обнаружен рядом с центром атома, но с большей вероятностью может оказаться в пределах сферической оболочки на некотором расстоянии от центра. Вероятность обнаружить электрон в пространстве между центром и этой оболочкой равняется нулю.

Справа: Атом углерода содержит шесть электронов. Четыре из них не имеют момента импульса, и распределения их вероятностей симметричны. Два других обладают небольшим моментом импульса, а это означает, что вероятностное распределение каждого может находиться в одной из трех возможных ориентаций – на рисунке показана одна.

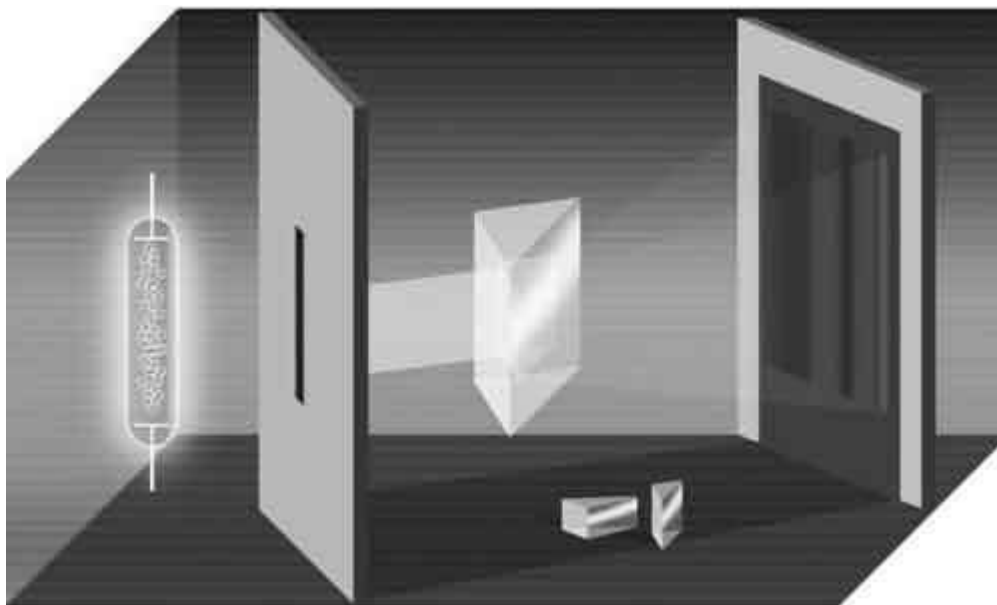


Электронные облака различных атомов (сверху вниз в порядке увеличения числа электронов: водород, кремний, железо и серебро). Когда заполняется каждая из орбиталей, следующим электронам приходится занимать более высокоэнергетические орбитали.

Таким образом, точно так же, как нам приходится утверждать, что атом проходит сквозь обе прорези одновременно, мы должны считать каждый электрон распространенным на весь объем атома. Это единственная приемлемая картина атома, которую нам позволяет иметь квантовая механика. Области, где каждый из электронов предпочитает проводить время, зависят от формы волновой функции конкретного электрона, которая, в свою очередь, задается квантовыми числами этого электрона. Все это связано со сложной математикой и не поддается интуитивному пониманию, в связи с чем гораздо проще придерживаться планетарной модели атома Резерфорда/Бора. Пускай она и неверна, но так мы хотя бы можем представить себе строение атома. Однако вся современная химия и значительная часть физики покоится на этой квантовой структуре атомов. Квантовые числа электронов определяют, как они распределяются по так называемым «квантовым орбиталиям» (которые напоминают нечеткие, неправильной формы орбиты)^[47] или «энергетическим уровням», а это прекрасно объясняет, как именно происходит классификация элементов в соответствии с их химическими свойствами и их расстановка в таблице Менделеева.

Квантовая механика предсказывает гораздо больше, чем просто распределение электронов внутри атома. Она также делает предсказания о перемещении электронов между энергетическими уровнями. Это происходит, к примеру, когда атомы взаимодействуют со

светом. Электроны могут поглощать фотоны, при условии что энергия фотонов соответствует энергетическим интервалам между различными уровнями. Если это происходит, фотон перестает существовать, так как он полностью поглощается в качестве чистой энергии для «возбуждения» электрона для перехода на более высокий энергетический уровень. Электрону, как правило, некомфортно обладать этой дополнительной энергией, и он вскоре испускает фотон ровно той энергии, которую необходимо отдать, чтобы перейти обратно на исходный уровень. Квантовая механика предсказывает частоту и интенсивность этого света, который вновь испускается возбужденными электронами атомов. Каждый тип атома обладает уникальной схемой уровней приемлемых энергий электронов, и рисунок света, отдаваемого атомами, когда их электроны опускаются на более низкие энергетические уровни, называется линейчатым спектром. Именно так астрономы понимают, какие элементы существуют в звездах и далеких галактиках, изучая лишь природу видимого света. Сегодня «спектроскопия» находит применение во многих областях.



При прохождении электрического тока сквозь водородный газ *внутри* нагнетательной трубки газ нагревается и излучает свет. Затем этот свет разделяется на составные цвета при помощи призмы. Однако, в отличие от солнечного света, дающего мягкий радужный спектр, в котором цвета переходят друг в друга, мы видим серию отдельных цветных полосок (называемую линейчатым спектром): красную, голубую и много полосок в фиолетовой области, которые становятся все ближе друг к другу, пока не затухают за пределами видимого спектра.

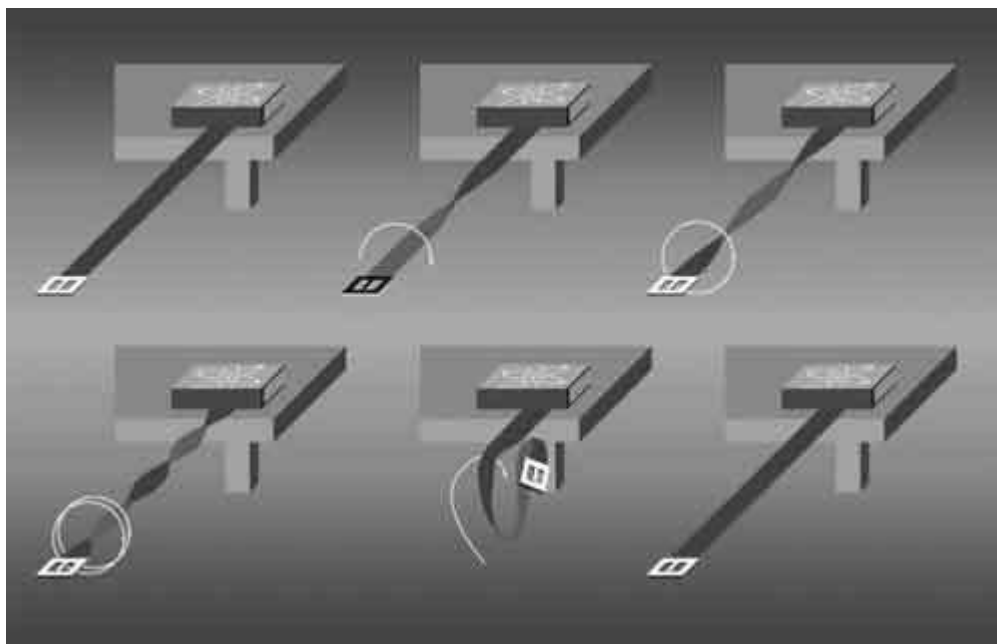
Квантовый спин

Практически все научно-популярные книги о квантовой механике объясняют происхождение квантовой странности, используя идею «спина». Я долго старался ее избегать, хотя она, пожалуй, представляет собой самое «квантовое» из всех квантовых свойств. Она очень далека от всего, что мы можем осмыслить в повседневных терминах.

В 1896 году голландец Питер Зееман обнаружил, что при помещении атомов в магнитное поле и их последующем возбуждении спектральные линии – узкие полоски света, формирующие определенную картину на экране, – расщепляются на несколько компонентов. В определенных случаях это расщепление можно было объяснить в терминах классической

(неквантовой) теории, предложенной Лоренцем, но в целом эффект был непонятен и назывался «аномальным эффектом Зеемана». Только в 1925 году Сэм Гаудсмит и Джордж Уленбек предположили, что он может быть связан с другим свойством электронов атома, которое становится более заметным под действием магнитного поля. Применив идеи, основанные на старой квантовой теории, включая орбиты электронов Бора, они предположили, что в дополнение к орбитальному движению вокруг ядра электрон также вращается вокруг своей оси (как вращается Земля при орбитальном движении вокруг Солнца). Но представить этот «квантовый спин»^[48] на основе нашего повседневного знания о вращающихся объектах вроде бейсбольных или крикетных мячей просто невозможно.

Проблема заключалась в том, что, подобно моменту импульса электрона, момент импульса этого спина тоже должен был быть проквантован. Прежде всего, все электроны вращаются с совершенно одинаковой «скоростью» и не могут ни замедлиться, ни ускориться. Направление их вращения еще более необычно – пока не установлено наблюдение, оно представляет собой суперпозицию различных направлений. При наблюдении мы должны определить ось (по сути – направление), вокруг которой они вращаются, и в итоге для нас они будут вращаться либо по часовой стрелке, либо против нее. Однако, пока мы не посмотрим на них, они будут пребывать в суперпозиции вращения в обе стороны одновременно!



Фокус с ремнем. Это далеко не самый удивительный из волшебных фокусов, однако он служит прекрасным примером природы квантового спина. Частицы-«фермионы», такие как электроны, характеризуются полуцелым спином. Это означает, что поворот электрона на 360 градусов не возвращает его в изначальное состояние. Для этого его нужно повернуть еще на 360 градусов. Я видел следующий пример, описанный в лекции Роберта Пенроуза^[49]: закрепите один конец ремня под тяжелой книгой на краю стола. Теперь нужно перекрутить ремень и снова расправить его, пропустив свободный конец сквозь петлю. Вам может показаться, что полный оборот не может быть сглажен всего одним пропуском ремня сквозь петлю. Это действительно так. Однако, если повернуть ремень на 360 градусов дважды, при пропускании свободного конца через петлю он полностью расправится. Не ищите в этой аналогии слишком многого, однако она может послужить примером того, как электрон поворачивается дважды, чтобы пройти «целый круг».

Наконец, поворот электрона на 360 градусов не вернет его в изначальное квантовое состояние – для этого он должен сделать два полных оборота! Это кажется нам странным, поскольку мы не можем не представлять электрон крошечным шариком, вращение которого обуславливается движением его внутренностей вокруг центра. Квантовый спин, однако, является гораздо более абстрактным понятием и вообще не может быть визуализирован.

Все элементарные частицы, составляющие материю, – такие как электроны, протоны и нейтроны и входящие в их состав кварки, – считаются обладающими полуцелым спином (измеряемым во множителях значения постоянной Планка) и принадлежат к классу частиц, называемых фермионами. Фотоны принадлежат к другому классу частиц, называемых бозонами, спин которых равняется целому числу постоянных Планка. Между фермионами и бозонами существует фундаментальное и очень важное различие, которое объясняется в статье «Принцип исключения Паули на с. 184.

Внутри ядра

Через несколько лет после открытия атомного ядра Резерфорд провел эксперимент, в котором он подверг атомы азота бомбардировке альфа-частицами. Он обнаружил, что в результате ядра водорода вылетают из ядер азота. Эти ядра содержали мельчайшую единицу положительного электрического заряда, равную и противоположную заряду электрона. Он назвал эти ядра водорода протонами и возродил старую идею английского химика. В 1815 году Уильям Праут предположил, что атомы всех элементов представляют собой скопления атомов самого легкого – водорода. Резерфорд выдвинул гипотезу, что это, возможно, не так уж далеко от правды. Что, если на самом деле это была характеристика атомных ядер? Может, ядра разных элементов представляют собой лишь скопления ядер водорода – то есть отдельных протонов? В таком случае ядро гелия должно было содержать два протона, ядро лития – три и так далее по таблице Менделеева.

Но этим дело не ограничивалось. Так как протоны содержали ту же величину электрического заряда, что и электроны, в ядрах должно было содержаться столько же протонов, сколько электронов вращалось вокруг них (чтобы обеспечить электрическую нейтральность атомов). Но ядра казались гораздо тяжелее суммы составляющих их протонов. Если бы вы не знали ответ на этот вопрос, что бы вы предположили?

В течение 1920-х годов ученые предложили своего рода хитрый фокус. Может, ядра состоят из протонов и электронов – само собой, не тех, что вращаются вокруг них по орбитам? Общее число протонов тогда должно было давать требуемую массу (о вкладе очень легких электронов здесь можно забыть), а электронов должно было быть ровно столько, чтобы они нейтрализовали положительный заряд избыточных протонов.

К несчастью, эта идея оказалась неправильной. И снова квантовая механика сумела указать верное направление. Принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что заключение электрона в крошечный объем ядра подразумевает точное знание его положения. Это означает, что его импульс будет слишком переменчивым, чтобы сила притяжения протонов сумела надолго удержать электрон на одном месте. Электроны просто не могут быть заключены внутри ядра.

Принцип неопределенности не проявляет фаворитизма по отношению к протонам, давая им честь жить внутри атомного ядра. Просто их гораздо большая масса предполагает, что они двигаются медленнее, чем электроны с такой же величиной импульса, а потому колебания их импульса не дают достаточно больших колебаний их движения^[50].

Проблема была решена в 1932 году, когда Джеймс Чедвик открыл совершенно новую частицу, которую называли нейтроном. Она обладала примерно такой же массой, как протон,

но не имела электрического заряда. Затем Гейзенберг предположил, что атомные ядра, вероятно, целиком состоят из протонов и нейтронов, и все вдруг встало на свои места.

Что дальше? Очевидно, должен был существовать новый тип силы притяжения, которая держала бы протоны и нейтроны вместе в пределах ядра. С такой силой физика прежде не сталкивалась. Взаимное электрическое отталкивание протонов и притяжение противоположно заряженных протонов и электронов представляет собой форму хорошо известной электромагнитной силы^[51]. Именно она вместе с силой притяжения прямо или косвенно вызывает практически все природные явления. Все материалы удерживаются вместе посредством электромагнитных сил, действующих между атомами. В более крупном масштабе нашу Вселенную удерживает вместе гравитационная сила.

Принцип исключения Паули

Один из величайших химиков всех времен, родившийся в Сибири Дмитрий Менделеев, который был самым младшим в семье, где было, по разным данным, от четырнадцати до семнадцати детей, в конце 1860-х годов изобрел теперь уже знакомую всем периодическую таблицу элементов. В ней он сумел сгруппировать все элементы со сходными химическими свойствами по семействам. Однако принцип формирования этих семейств оставался загадкой более полувека, пока австрийский вундеркинд Вольфганг Паули не предложил свой знаменитый «принцип исключения».

Паули объяснил, что элементы обладают различными химическими свойствами в зависимости от того, как именно их электроны располагаются на различных квантовых орбитах, или оболочках. Каждый электрон описывается квантовыми числами, присвоенными его волновой функции. Это определяет значения его проквантованной энергии, момента импульса и спина. Паули заметил, что ни одна пара электронов в одном атоме не может обладать одинаковыми квантовыми числами. Как только конкретное квантовое состояние оказывается «занятым», остальным электронам приходится искать себе другое место.

Принцип исключения также объясняет, почему электроны не падают на ядро, а следовательно, и как материя существует в своей форме.

Таким образом подчеркнутая Бором проблема получила объяснение. Очевидно, что, если бы все электроны атома падали на низший энергетический уровень, все элементы обладали бы одинаковыми химическими свойствами. Свойства элемента определяются не общим числом электронов в атомах, а тем, как расположены их внешние электроны. Электроны последовательно заполняют «оболочки», причем каждая из оболочек содержит конкретное количество электронов, которое обуславливают определенные законы, использующие квантовые числа. Как только оболочка заполняется, следующему электрону приходится перемещаться на следующий энергетический уровень. Внешние (валентные) электроны сообщают нам, как атомы связываются друг с другом и формируют, казалось бы, бесконечное число химических веществ, встречающихся в природе, а также объясняют многие физические свойства этих атомов – например, почему определенные материалы лучше других проводят тепло и электричество.

Частицы, такие как электроны, протоны и нейтроны, которые все вместе называют фермионами, подчиняются принципу исключения Паули. Другой класс частиц, бозоны, не подчиняются ему. Фотоны, к примеру, не стесняются занимать одно и то же квантовое состояние и даже предпочитают поступать именно так. Здесь часто приводится такая аналогия: фермионы сравниваются со слушателями концерта классической музыки, которые сидят на своих местах, идущих друг за другом рядами, а бозоны сравниваются со зрителями рок-концерта, которые все как один хотят пробиться как можно ближе к сцене.

Однако глубоко в ядре атома действует сила другого типа. В 1935 году японский физик Хидэки Юкава предложил объяснение этой ядерной силы, которое в итоге принесло ему Нобелевскую премию. Для этого он оттолкнулся от идеи, которая впоследствии стала одним из основных ингредиентов в сфере физики частиц, а именно от идеи об обменной частице. Чтобы объяснить, что это такое, мне придется прибегнуть к двум уже знакомым концепциям: принципу неопределенности Гейзенберга и уравнению Эйнштейна $E=mc^2$.

Создание частиц из воздуха

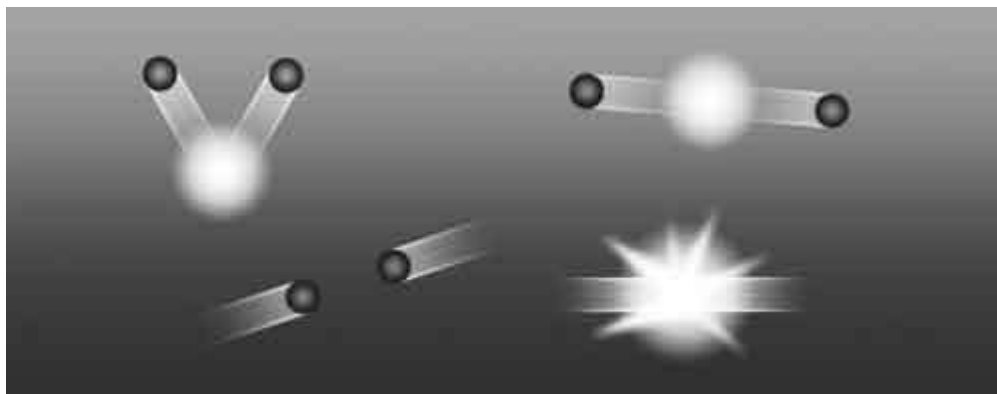
Не забывайте, что принцип неопределенности в общем виде представляет собой утверждение, что мы не можем присвоить точные значения двум комплементарным величинам, таким как положение и импульс частицы, одновременно. Это сродни желанию, чтобы подброшенная монетка одновременно упала и орлом, и решкой вверх. В эту категорию попадают и другие пары величин, в частности энергия частицы и точное время, в течение которого она этой энергией располагает. Точно так же, чем короче изучаемый нами временной интервал, тем более сильные колебания энергии мы увидим. Однако, в отличие от связи положения и импульса частицы, которая привела нас в темные глубины волновых функций и природы того, что существует, пока мы не смотрим, отсюда вытекает совершенно определенное и удивительно простое следствие: что частицы создаются из ничего!

В квантовом мире временная шкала событий действительно очень и очень коротка. Я приведу один из потрясающих примеров, к которым любят прибегать ученые и которые требуют быстрых расчетов с неприличным количеством нулей. За одну секунду фотон может переместиться с одного конца атомного ядра на другой (не превышая при этом внутриядерного ограничения скорости) большее число раз, чем количество секунд, прошедших с момента Большого взрыва^[52]. Эта короткая временная шкала позволяет частицам, а именно протонам и нейтронам, ловко использовать принцип неопределенности очень важным образом. На очень короткий промежуток времени они могут заимствовать энергию буквально из ниоткуда при условии, что успеют вернуть ее до нарушения принципа неопределенности. Чем короче промежуток времени, на который им нужна энергия, тем больше энергии они могут позаимствовать.

Дальше наступает второй этап: уравнение Эйнштейна гласит, что масса и энергия взаимозаменяемы, так что позаимствованная энергия может быть использована для создания частицы определенной массы. Юкава предположил, что внутри ядра создается такая частица, которую теперь называют пионом. Эта частица, согласно его гипотезе, отвечает за силу притяжения, которая удерживает вместе протоны и нейтроны, совместно называемые нуклонами. Расчеты Юкавы предсказали, что пион создается одним нуклоном, который заимствует из окружающей среды достаточно энергии для его создания. Затем пион перепрыгивает к соседнему нуклону и снова исчезает. За краткий период своего существования, позволенный принципом неопределенности, он становится предметом обмена двух нуклонов и приводит к возникновению силы притяжения, которая притягивает их друг к другу. Этот пион часто считается виртуальной, а не реальной частицей, так как его существование мимолетно.

Точно так же электромагнитную силу между заряженными частицами можно представить в качестве обмена виртуальным фотоном, отличным от реальных фотонов, которые могут сколько угодно долго сохранять свою энергию, конечно, при условии, что их не поглотит атом. Виртуальные частицы, которые можно создать из чистой энергии, называются бозонами. Их также называют частицами-переносчиками взаимодействий, в том смысле что, когда происходит обмен двух других частиц с этой частицей, между ними возникает взаимодействие. Бозоны подчиняются иным квантовым законам, чем называемые фермионами настоящие частицы материи, включая электроны, протоны и нейтроны, из которых состоят атомы, а следовательно, и вся материя вокруг нас. Однако, благодаря работе

одного из величайших физиков-теоретиков всех времен стеснительного англичанина Поля Дирака, мы знаем, что из ничего могут создаваться даже фермионы (см. статью «Антиматерия»).



На квантовом уровне даже пустое пространство на самом деле не полностью пусто, а кипит активностью: тут и там постоянно возникают и исчезают виртуальные частицы. При рождении пар частица и ее партнер из антиматерии создаются из чистой энергии, скажем, из фотона. В обратном процессе, называемом аннигиляцией, частица и античастица сталкиваются и уничтожают друг друга, навсегда исчезая во вспышке света.

Ядерные взаимодействия

Справедливо сказать, что изучение атомного ядра было и остается одной из самых сложных сфер человеческих стремлений. Причина этого кроется в сложной природе сил, которые действуют между компонентами ядра – протонами и нейтронами. Из четырех известных сил природы три важны внутри ядра. Вы уже знакомы с электромагнитной силой, которая отталкивает протоны друг от друга, так как одинаковые заряды отталкиваются, и с так называемым «сильным ядерным взаимодействием», которое притягивает все нуклоны (протоны и нейтроны) друг к другу. Также существует второе ядерное взаимодействие, называемое слабым, которое отвечает за бета-распад. К нему я скоро вернусь.

Именно взаимное влияние отталкивающей электромагнитной силы и притягивающего сильного ядерного взаимодействия обеспечивает стабильность ядра. Так как на расстоянии влияние этих сил меняется, их комбинированный эффект формирует на поверхности ядра энергетический барьер, называемый кулоновским. Он, по сути, представляет собой силовое поле, которое сдерживает протоны в определенном объеме^[53].

Точно так же положительно заряженная частица, ударяющаяся о ядро снаружи, может проникнуть внутрь, если она обладает достаточной энергией, чтобы пробиться сквозь кулоновский барьер. Однако эти частицы могут пробиться сквозь барьер и более интересным образом, даже если их энергии для этого недостаточно. Здесь мы встречаемся с еще одной квантовой идеей, которая объясняет не только альфа-распад в радиации, но и причину, по которой Солнце светит, а мы живем в этом мире.

Эта новая идея получила название квантового туннелирования (см. статью на странице 194). Когда альфа-частица, состоящая, как мы теперь знаем, из двух протонов и двух нейтронов, испускается ядром, ей прежде всего приходится преодолеть кулоновский барьер, чтобы вырваться наружу. Но если применить к атомному ядру знакомые нам идеи ньютоновской физики, мы увидим, что это невозможно. Группа из двух протонов и двух нейтронов, тесно связанных вместе, никогда не накопит достаточного количества энергии, чтобы вырваться из ядра.

Антивещество

В группу молодых гениев, которые поставили квантовую механику на твердое математическое основание, наряду с Гейзенбергом, Паули и рядом других ученых входил и Поль Дирак. На самом деле по результатам недавнего опроса Дирак был назван вторым величайшим английским физиком всех времен, уступив лишь Исааку Ньютону.

Стоит отметить, что Дирак входил в небольшое число выдающихся физиков, которые в 1927 году на знаменитом Сольвеевском конгрессе не стали спорить о разных интерпретациях квантовой механики. Его гораздо больше интересовала эстетическая красота математических уравнений, чем их значение!

В 1927 году Дирак доказал, что две разные формулировки теории, предложенные Гейзенбергом и Шрёдингером, математически эквивалентны друг другу. Затем он первым объединил квантовую механику со специальной теорией относительности Эйнштейна посредством вывода альтернативного уравнению Шрёдингера уравнения, которое описывало поведение электронов, движущихся на скорости, стремящейся к скорости света. Однако уравнение Дирака делало странное предсказание, что должна существовать зеркальная электрону частица, или его античастица. Она должна была обладать такой же массой, как электрон, но противоположным зарядом. Такая частица была названа позитроном и через несколько лет обнаружена в ходе эксперимента. Позитрон также называют партнером электрона из антивещества.

Теперь мы знаем, что каждая элементарная частица имеет соответствующую античастицу. Вступая во взаимодействие, они аннигилируют во вспышке энергии, так как все их свойства, кроме массы, исключают друг друга, а масса превращается в чистую энергию. Количество создаваемой энергии можно рассчитать по уравнению Эйнштейна $E=mc^2$.

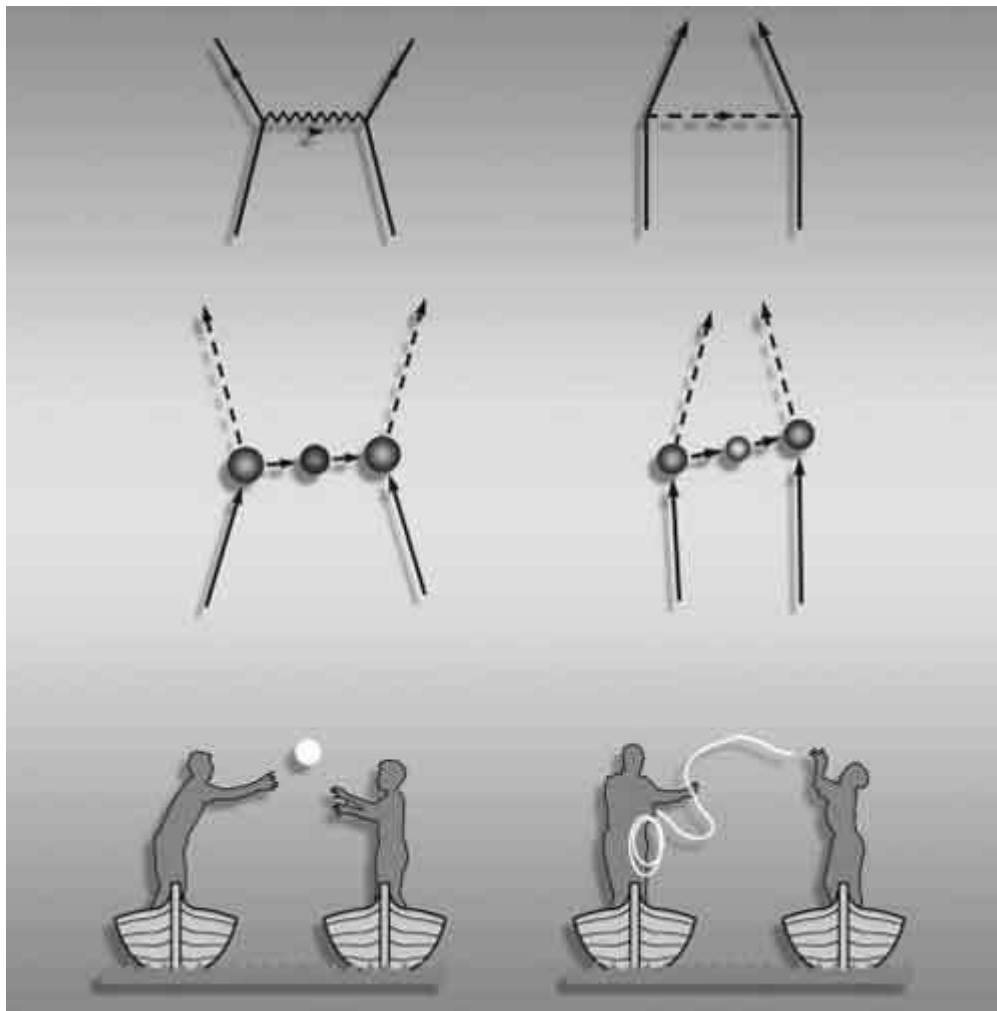
Этот процесс может происходить и в обратном порядке, когда чистая энергия преобразуется в материю: фотон, который фактически представляет собой сгусток света, может превратиться в электрон и позитрон в ходе процесса, называемого рождением пар.

Интереснее всего, что пары частица-античастица то и дело возникают повсюду, заимствуя энергию, необходимую для их создания из окружающей среды в соответствии с соотношением неопределенности энергии и времени, и существуя очень короткий промежуток времени, прежде чем аннигилировать снова и вернуть позаимствованную энергию, словно их и не существовало вовсе.

Альфа-распад несложно объяснить с позиции соотношения неопределенности между энергией и временем, как это сделано в упомянутой статье на странице 194. Но, если предпочитаете – и если уж следовать духу этой книги, – его можно понять и с позиции волновой функции альфа-частицы.

Давайте возьмем радиоактивное ядро, которое точно еще не испустило альфа-частицу. Местоположение альфа-частицы описывается волновой функцией, которая заключена внутри ядра, под чем я понимаю, что в это время вероятность ее обнаружения за пределами ядра равняется нулю. Но вместо того чтобы представлять, как альфа-частица катается внутри ядра, подобно крошечному шарiku в коробке, пока не наберет достаточной энергии для выхода, мы скажем, что ее волновая функция начинает просачиваться за пределы ядра. По прошествии короткого времени вероятность обнаружения альфа-частицы за пределами ядра мала, большая часть волновой функции по-прежнему находится внутри ядра, тем самым давая высокую вероятность отсутствия распада. Но с течением времени вероятность, которую мы рассчитываем на основании той части волновой функции, которая просочилась за пределы ядра, возрастает и становится значительной.

Решая уравнение Шрёдингера, чтобы получить значения волновой функции в разные моменты времени, мы обнаружим, что результирующие вероятности точно согласуются с наблюдаемой формулой радиоактивного распада. Это означает, что, начав с большого числа радиоактивных ядер, мы увидим, что ровно половина их распадется через определенный временной интервал, называемый «периодом полураспада». Когда пройдет еще один период полураспада, останется лишь четверть от начального количества ядер – и так далее. Но вероятностная природа получаемой нами из волновой функции информации объясняет, почему мы никогда не можем точно предсказать, в какой момент распадется конкретное ядро.



Действующие между частицами силы – как притяжения, так и отталкивания – можно представить происходящими посредством обмена третьей частицей.

Тот же самый процесс можно представить и по-другому. Вверху: Физики описывают взаимодействия частиц, используя «диаграммы Фейнмана». Сплошные, волнистые и пунктирные линии обозначают направление движения частиц, а изменение положения частиц с течением времени можно узнать, изучая страницу с диаграммами. Таким образом, левая диаграмма описывает, как два электрона изначально встречаются, обмениваются фотоном и отталкиваются. Справа протон и нейтрон остаются на одном расстоянии, пока не обмениваются пионом и не притягиваются друг к другу.

Посередине: Более схематичная диаграмма тех же процессов.

Внизу: Силу отталкивания между электронами можно представить в виде двух людей, стоящих в лодках и перебрасывающих друг другу мяч. Сначала назад отодвигается

бросающий, затем ловящий. Сила притяжения подобна тому, как один человек бросает веревку, а другой ловит ее, чтобы приблизиться к нему.

В отличие от сильного ядерного взаимодействия, которое связывает протоны и нейтроны внутри ядра, слабое ядерное взаимодействие служит совершенно другой цели. Оно вызывает второй тип радиоактивности, называемый бета-распадом. Существует два типа бета-частиц: электроны и их античастицы – позитроны. В отличие от альфа-частиц, которые можно считать изначально присутствующими в ядре, так как они тоже состоят из нуклонов, электроны и позитроны должны создаваться в ходе особых процессов.

Соотношение протонов и нейтронов в определенных ядрах не подходит для максимизации стабильности. Чтобы восстановить баланс^[54], нейтроны или протоны могут преобразовываться друг в друга, в процессе создавая электрон или позитрон для сохранения электрического заряда. Следовательно, ядро, обладающее слишком большим избытком нейтронов, будет подвержено бета-распаду, в ходе которого нейтрон будет преобразовываться в протон и электрон, причем последний будет испускаться наружу. Избыток протонов вынудит один из них преобразоваться в нейтрон и позитрон, который заключит в себе заряд протона.

В 1933 году Вольфганг Паули понял, что этот процесс должен включать в себя создание другой, еще не обнаруженной частицы, которая объясняла бы, почему энергия испускаемых бета-частиц не сходится с балансом. Эта новая и крайне трудноуловимая частица, существование которой было экспериментально подтверждено только в 1956 году, получила название нейтрино^[55].

Квантовое туннелирование

Квантовое туннелирование, также называемое туннельным эффектом, представляет собой еще одно удивительное явление, характерное лишь для квантового мира. Представьте следующее: чтобы мяч закатился на холм и скатился с другой стороны, ему изначально нужно придать достаточное количество энергии. По мере подъема по склону он будет постепенно замедляться, а если энергии для достижения вершины окажется недостаточно, он остановится и скатится обратно. Но, если бы мяч вел себя квантовомеханически, всегда существовала бы определенная вероятность, что он вдруг исчезнет с одной стороны холма и появится на другой. Это произошло бы, даже если бы ему не хватило энергии, чтобы достичь вершины и преодолеть холм адекватным образом.

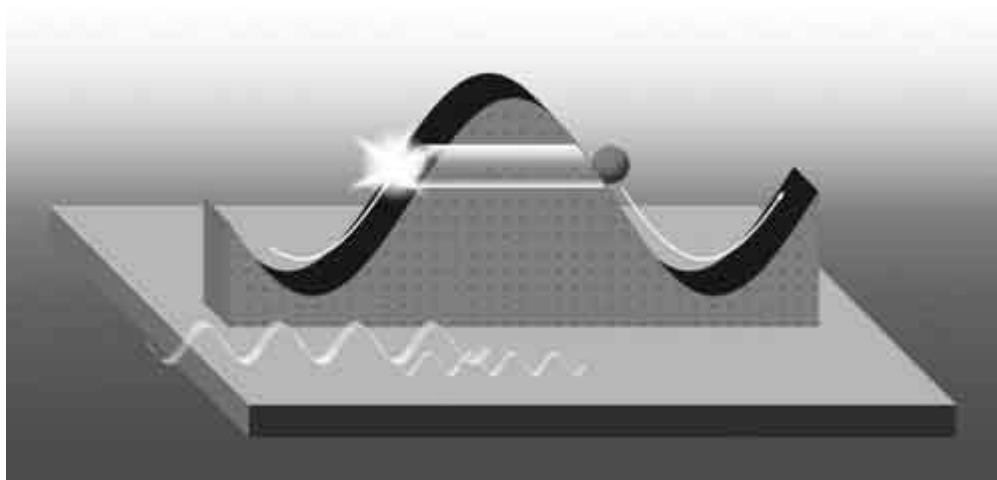
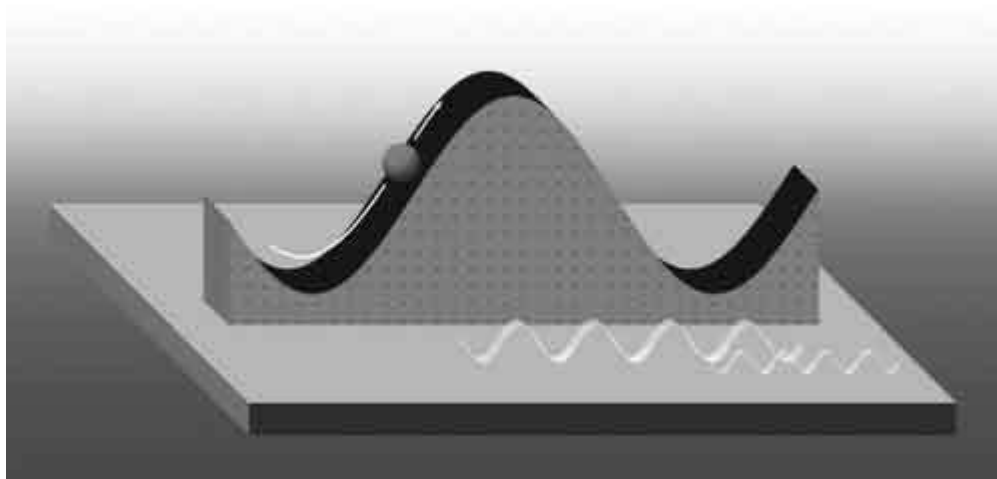
Обычно квантовое туннелирование объясняют, обращаясь к соотношению неопределенности Гейзенберга между энергией и временем: при условии, что энергетический барьер, сквозь который необходимо пройти частице, не слишком высок или широк, частица может позаимствовать из окружающей среды достаточное количество энергии, чтобы преодолеть его. При этом позаимствованную энергию необходимо вернуть в течение заданного соотношением неопределенности промежутка времени.

Если сказать точнее, мы должны представлять волновую функцию частицы пребывающей в суперпозиции нахождения по обе стороны барьера одновременно. Барьер преодолевает именно волновая функция. Только установив наблюдение, мы вызываем «коллапс волновой функции», чтобы обнаружить частицу либо по одну сторону барьера, либо по другую.

Квантовое туннелирование играет важную роль во многих процессах. Объяснив механизм альфа-излучения, оно стало первым успешным применением квантовой механики к ядерным

проблемам. Оно также сформировало фундамент для появления многих современных электронных устройств, например туннельного диода.

На повседневном уровне туннелирование происходит в домашней алюминиевой проводке. На поверхности открытой электрической проводки появляется тонкий слой оксида алюминия, который формирует изолирующий слой между двумя проводами, переплетенными для создания контакта. Согласно классической физике, это должно останавливать электрический ток. Однако слой оказывается достаточно тонким, чтобы электроны могли туннелировать сквозь него и поддерживать напряжение.



В обычной жизни, если мяч катится на холм, не имея достаточного количества энергии, чтобы преодолеть вершину, он останавливается и естественным образом скатывается обратно. Квантовое туннелирование позволяет мячу внезапно пропадать с одного склона холма и появляться на другом склоне. Хотя в макром мире мы не сталкиваемся с таким волшебством, этот процесс вполне зауряден для квантового мира. Само собой, в этом случае холм является энергетическим и его можно представить в качестве такого типа силового поля, преодолеть которое квантовая частица должна быть не в состоянии.

И бета-, и альфа-распад представляют собой способы, которыми ядра могут преобразовываться из одного вида в другой. Вместе с процессами деления и синтеза, в ходе которых ядра распадаются пополам или объединяются, это объясняет, как впервые сформировались некоторые элементы, которые мы видим вокруг, в том числе и те, что входят

в состав наших тел. Углерод, кислород и азот, а также другие элементы, формирующие необходимые для жизни химические составы, миллиарды лет назад были синтезированы внутри звезд. Этих звезд уже нет, поскольку они взорвались и стали сверхновыми, а существенная доля их содержимого была выброшена в космос и в конце концов сформировала часть нашей Солнечной системы. Именно поэтому и появилось заезженное, но довольно верное выражение, что все мы состоим из звездной пыли.

Многие более тяжелые элементы создаются только при мощном взрыве крупной звезды, превращающейся в сверхновую. Чем выше температура и экстремальнее условия внутри звезды, тем дальше сможет пойти процесс синтеза и тем тяжелее будут сформированные элементы. Внутренняя часть звезды становится достаточно горячей и плотной для создания тяжелых элементов только в эти последние и напряженные мгновения ее жизни^[56].

Два самых легких элемента, водород и гелий, были созданы не внутри звезд, а на заре существования Вселенной, сразу же после Большого взрыва. Сегодня примерно 98 процентов всего видимого вещества во Вселенной состоит из этих двух элементов, а оставшиеся 2 процента – из всего остального.

Богатое разнообразие ядер, которые могут существовать в зависимости от того, как именно комбинируются протоны и нейтроны (пока мы изучили всего несколько сотен из около семи тысяч их возможных видов)^[57], объясняется двумя причинами. Во-первых, протоны и нейтроны подчиняются сходным квантовым правилам с вращающимися вокруг ядра электронами, которые определяют, как именно они могут располагаться внутри ядер. Подобно электронам, которые должны описываться волновыми функциями, чью форму определяют соответствующие квантовые числа, нуклоны тоже правильнее представлять в качестве распространенных сущностей, распределяющихся внутри ядра согласно их квантовым числам.

С электронами мы хотя бы можем позволить себе роскошь представить их в качестве крошечных мячиков, вращающихся вокруг ядра, даже если это неправильно. Внутри ядра пространство ценится на вес золота и нуклоны так плотно стоят друг к другу, что мы можем лишь представить сумку с мячами, которые борются за место.

На практике наше представление о нуклоне зависит от того, как мы пытаемся его изучить. Если нам хочется описать, как высокоэнергетические протоны или нейтроны, бомбардирующие ядро, взаимодействуют с другими нуклонами, мы обнаруживаем, что их довольно логично считать крошечными локализованными частицами. Однако внешний нейтрон в нейтронном облаке (см. статью «Ядерные облака» в Главе 3) обладает волновой функцией, которая распространяется на большой объем вокруг всего ядра.

Вторая причина сложности ядер связана с природой сильного ядерного взаимодействия, которое, как оказывается, имеет даже более фундаментальное происхождение, чем предполагал Юкава, предлагая свою картину обмена пионами. Ко второй половине XX века физики начали задумываться, не происходят ли внутри нуклонов некие более глубокие процессы.

Кварки

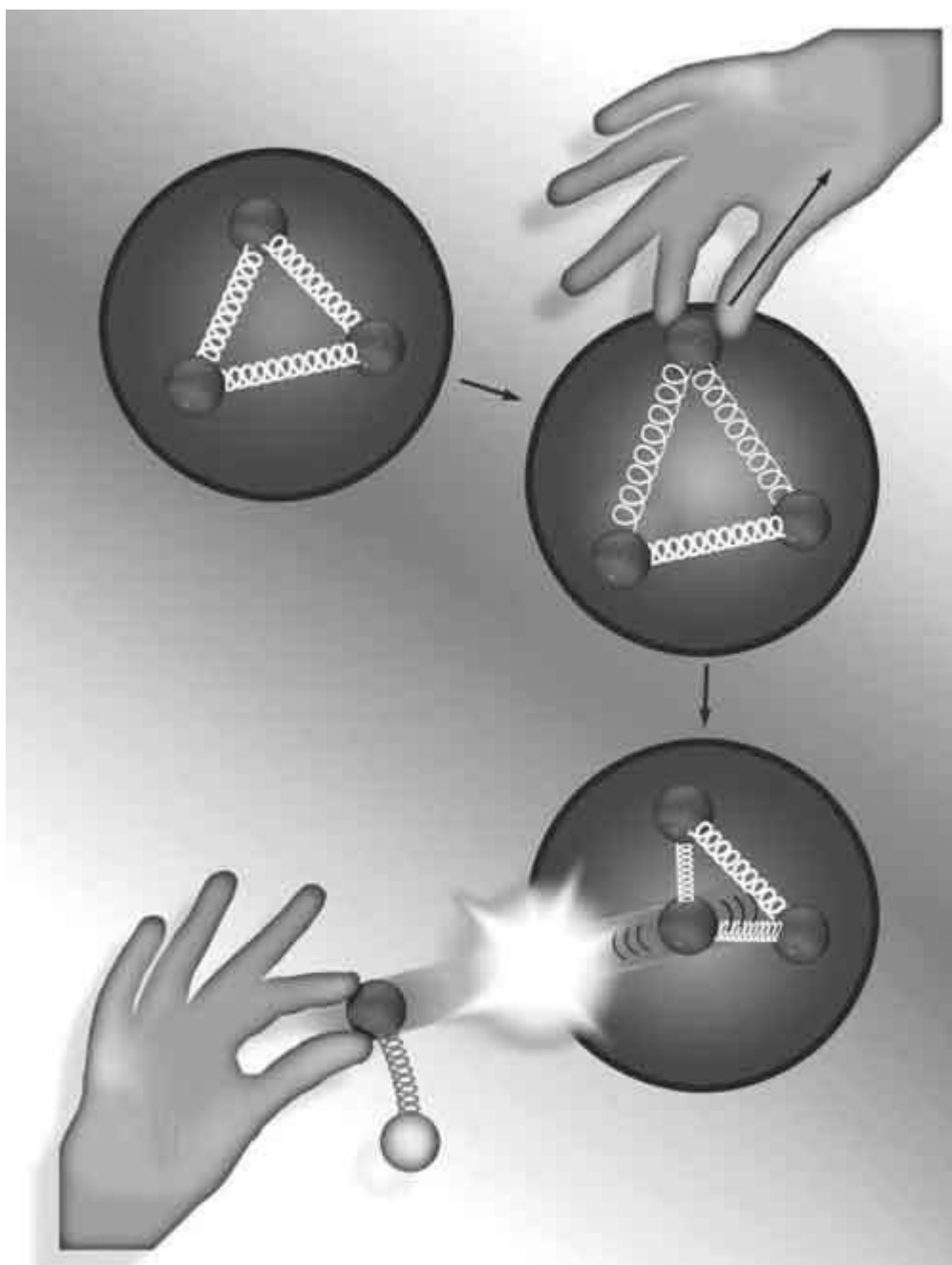
К середине 1930-х годов было известно о существовании нескольких элементарных частиц. Помимо протонов, нейтронов и электронов, которые составляют атомы обычной материи, и фотонов электромагнитного излучения, физики также обнаружили позитроны и нейтрино. Затем, вскоре после появления теории о пионах Юкавы, в космических лучах засекли новую частицу, которую сначала ошибочно приняли за пион Юкавы. На самом деле она напоминала тяжелый и нестабильный электрон и сегодня называется «мюоном». Мюоны формируются в

верхних слоях атмосферы Земли, когда высокоэнергетические протоны, прилетающие из космоса, сталкиваются с молекулами воздуха, и продолжительность их жизни составляет всего лишь долю секунды. Пионы были экспериментально обнаружены несколькими годами позже.

Чтобы глубже изучить структуру квантового мира, вскоре были построены ускорители частиц (или дробилки атомов, как их сначала называли). Идея была проста: вместо использования света для исследования субатомных структур физики последовали примеру Резерфорда с альфа-частицами. Однако, чтобы изучать более маленькие линейные масштабы, им нужны были более энергетические частицы. Что важно, они использовали волнообразные свойства частиц материи, а не световые волны. Чем выше энергия пучка частиц, тем короче длина волны де Бройля и меньше итоговый линейный масштаб. Кроме того, чем больше энергии можно освободить из крошечного объема посредством все более мощных столкновений частиц, тем выше вероятность создания из этой энергии все более и более экзотических частиц.

Ко второй половине XX века было открыто так много новых элементарных частиц, что физики начали задумываться, действительно ли их можно называть элементарными. Как выяснилось, атомы 92 различных элементов состояли всего из трех частиц – протонов, нейтронов и электронов, – так, может, все эти частицы тоже состояли из нескольких более фундаментальных компонентов?

При классификации частиц было обнаружено, что одно семейство включает в себя слишком много вариаций. Подверженные сильному взаимодействию адроны подразделяются на две группы. Первую составляют барионы, включая протон и нейтрон. К ним вскоре добавился целый ряд новых частиц-барионов, в том числе «лямбда», «сигма», «кси» и «омега». Вторая группа, называемая мезонами, включает в себя пион, а также несколько других, более тяжелых частиц, таких как «эта» и «каон».



Мы не можем вынуть отдельные кварки из частицы вроде нуклона. Даже если мы дадим достаточно энергии, чтобы разорвать связь между кварками, с помощью этой энергии у нас получится лишь создать новую пару кварк/антикварк посредством так называемого «рождения пар» (см. рисунок на странице 188). Новый кварк встанет на место вынутого из нуклона, а антикварк объединится с вынутым кварком и сформирует мезон.

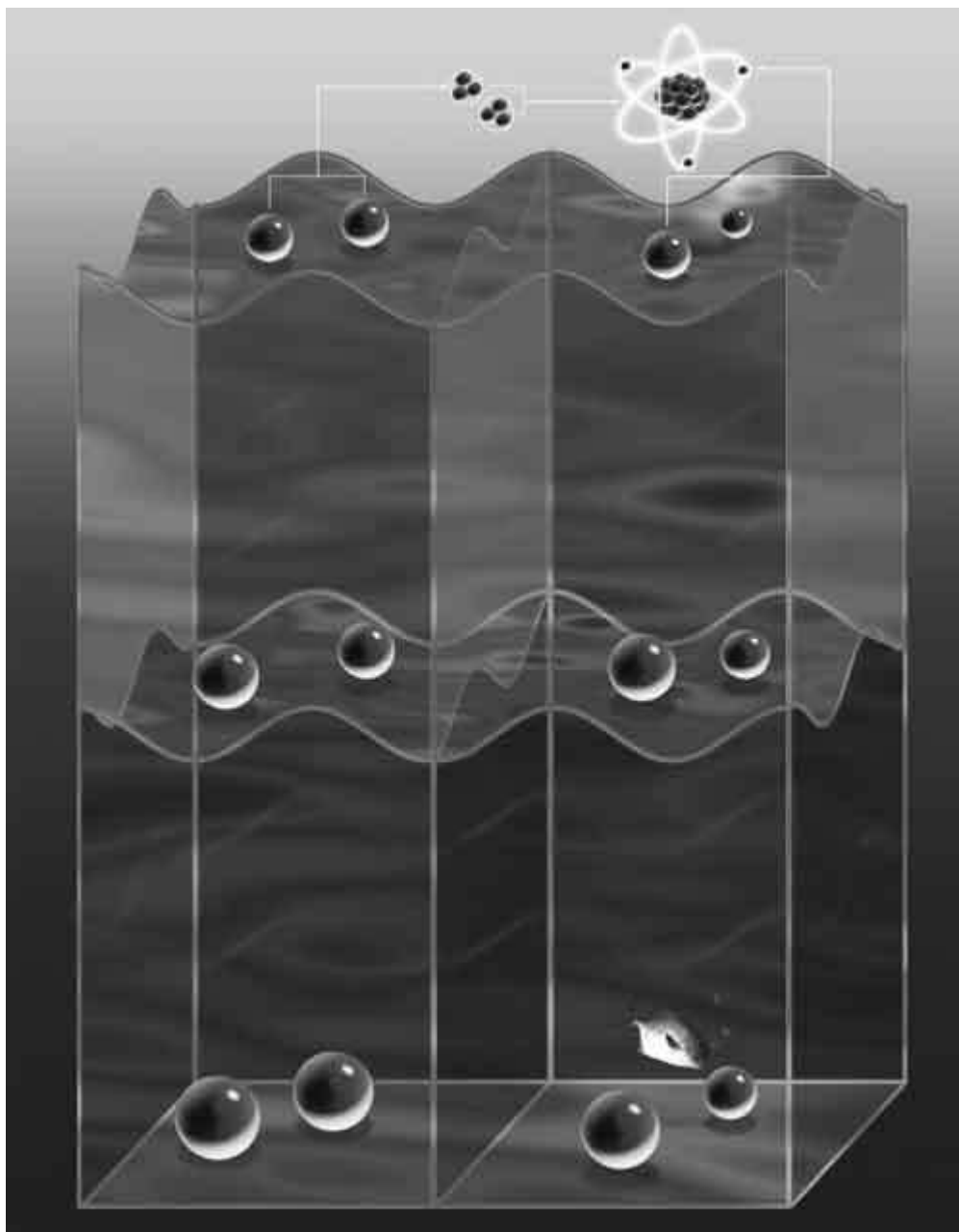
В попытке восстановить простоту и лаконичность два теоретика, Марри Гелл-Ман и Джордж Цвейг, предположили, что все адроны (барионы и мезоны) обладают внутренней структурой. Они продемонстрировали, что все различные вариации можно представить состоящими из более элементарных частиц, называемых «кварками».

Всего несколькими годами позже эта гипотеза получила подтверждение в Стэнфордском центре линейного ускорителя в Калифорнии. В ходе эксперимента, который в значительной степени напоминал знаменитый опыт Резерфорда с рассеянием альфа-частиц, в свое время подтвердивший гипотезу о внутреннем строении атомов, высокоэнергетические электроны

отскакивали от протонов и нейтронов. На этот раз направление отталкивания электронов показало, что внутри каждого нуклона содержится три крошечных сгустка материи. Существование кварков было доказано.

Сначала считалось, что существует всего три типа (называемых «ароматами») кварков. Теперь мы знаем, что всего их шесть, причем каждый обладает различной массой. Протоны и нейтроны состоят всего из двух типов кварков, названия которых довольно незамысловаты: протон содержит два «верхних» кварка и один «нижний», а нейтрон – два «нижних» и один «верхний».

Как выяснилось, заряд протона или электрона представляет собой не самую маленькую единицу электричества. Три кварка заряжены отрицательно и обладают по одной третьей заряда электрона каждый, а другие три кварка заряжены положительно и содержат по две трети заряда протона. Таким образом два верхних кварка, положительный заряд каждого из которых равен двум третям заряда электрона, и один нижний кварк, отрицательный заряд которого равен одной трети заряда электрона, вместе составляют заряд протона, а два нижних и один верхний нивелируют заряды друг друга внутри электрически нейтрального нейтрона.



Фермионы включают три поколения семейств частиц: в нижней части левой колонки находятся кварки, а в нижней части правой – лептоны. Вся состоящая из атомов материя во Вселенной создана исключительно из частиц первого поколения (они изображены на поверхности). В это семейство входят верхние и нижние кварки, которые составляют нуклоны в атомном ядре, электрон и его нейтрино. Частицы второго и третьего поколения гораздо более тяжелы и имеют очень краткий срок жизни. Их можно создавать в ускорителях частиц.

Четыре других аромата называются – хотя на это и нет особых причин – «странностью», «очарованием», «прелестью» и «истинностью». Лично я предпочитаю описание четырех ароматов магии, данное Терри Пратчеттом в романах о Плоском мире: «верхний», «нижний», «поперечный» и «мятный»!

В дополнение к электрическому заряду кварки должны также обладать другим свойством, называемым цветным зарядом. Он необходим, чтобы объяснить, почему для создания нуклонов и всех остальных барионов кварки группируются исключительно по три, но встают

в пары кварк/антикварк для создания пионов и сходных с ними мезонов. Подробнее об этом я расскажу в Главе 8.

Сегодня известно о существовании всего двух видов элементарных частиц материи: кварков и лептонов. Лептонами называют все частицы, которые не подвержены сильному ядерному взаимодействию, – то есть все частицы, не имеющие цветного заряда, а иными словами: все элементарные частицы материи, за исключением кварков! К лептонам относится электрон и два его более тяжелых собрата, мюон и таулептон, а также три типа нейтрино.

Что ж, приятно хотя бы осознать, что первая открытая элементарная частица, обнаруженная более ста лет назад, до сих пор остается элементарной. Отдадим должное электрону.

Так насколько мы уверены, что электроны и кварки представляют собой самые фундаментальные кирпичики материи? Быть может, со временем мы выясним, что они тоже обладают внутренней структурой. Быть может, существует и кое-что более базовое и фундаментальное.

Элементарные компоненты

Фрэнк Клоуз, профессор физики, Оксфордский университет

На различных этапах истории появлялись разные кандидатуры на звание фундаментальных кирпичиков материи. Столетие назад фундаментальными считались атомные элементы, к 1930-м им на смену пришли электроны, протоны и нейтроны. Сегодня электрон по-прежнему в нашем списке, но протоны и нейтроны, как выяснилось, состоят из более мелких частиц – кварков. При изучении истории возникает очевидный вопрос: действительно ли электрон и кварки фундаментальны или же они тоже состоят из еще более мелких частиц, как русские матрешки? Честный ответ таков: мы не знаем! Мы можем лишь сказать, что сегодня ни один из лучших экспериментов не дает и намека на наличие более глубинной структуры. В то же время есть намеки, что в этом слое «космического лука» есть нечто особенное.

Как мы к этому пришли? Есть две экспериментальные техники: рассеяние и спектроскопия.

Если предполагаемый фундаментальный слой на самом деле состоит из более глубинных компонентов, квантовая механика ограничивает способы распределения этих компонентов. Одна из таких конфигураций будет обладать наименьшим количеством энергии: мы называем ее основным состоянием. Один или несколько компонентов могут пребывать в более высокоэнергетическом состоянии, из-за чего вся система будет обладать большим количеством энергии. Компонент может испускать фотон света, теряя энергию в процессе; а поглощение фотона подходящей энергии может переводить систему из основного состояния в более высокоэнергетическое. На основании спектра энергий фотона можно вывести рисунок энергетических уровней (результатирующей) системы.

Итоговые энергетические уровни молекулы (из-за вибрации атомов друг возле друга); атома (из-за его электронов); ядра (из-за вибрации и вращения его протонов и нейтронов) и даже самих протона или нейтрона (из-за движения составляющих их кварков) с качественной точки зрения кажутся очень похожими. Однако количественно они различаются.

Единицы энергии на квантовом уровне называются «электронвольтами»: $1\text{эВ} = 1,6 \times 10^{-19}$ Джоулей. Чтобы вы получили представления о масштабе этой единицы, скажу, что обычно требуется несколько эВ, чтобы выбить электрон из атома. Для возбуждения молекул необходимы миллиэлектронвольты (мэВ); ядра атомов возбуждаются под воздействием

миллионов электронвольт (МэВ), а протоны и нейтроны – под воздействием сотен МэВ. Это отражает еще более мелкие масштабы расстояний и действующих сил при переходе от относительно крупных молекул к маленьким протонам. Это первый намек на существование более глубокой структуры. Рассеяние напрямую от этих компонентов (как в экспериментах Резерфорда на атомном ядре или высокоэнергетическое рассеяние пучков электронов на кварках) показывает их внутренние составляющие.

Представим, что мы аналоговым способом перечислили все вариации кварка или электрона, мюона и тау-лептона. Самые легкие из них обладают массой порядка МэВ. Тау-лептон, очарованный кварк и прелестный кварк находятся в масштабе ГэВ (миллиардов эВ), а истинный кварк – сотен ГэВ. Может ли это быть признаком новой спектроскопии, основанной на «субкварках» и «сублептонах»?

Однако здесь не получается следовать по знакомому пути. К примеру, нет никаких признаков электромагнитных переходов (испускания или поглощения фотонов) между «тяжелыми» и «легкими» лептонами, хотя именно это произошло бы, если бы они представляли собой просто возбужденные состояния друг друга. В отношении кварков это тоже верно, хотя свидетельства здесь менее прямые. Кроме того, все эти частицы обладают одинаковым спином (половиной постоянной Планка), а в спектроскопии возбуждения обычно наблюдается весь диапазон значений спина. В дополнение к этому есть косвенные намеки, что существуют максимум три «поколения», в то время как простой спектр возбуждения включал бы в себя весь диапазон состояний. Наконец, их размер (если они вообще существуют) составляет менее 10^{-18} м, а в таком мизерном измерении их массы должны составлять порядка многих ГэВ, а не МэВ (в случае с верхним и нижним кварками и электроном).

Либо эти частицы действительно фундаментальны, либо здесь работает что-то за пределами традиционной квантовой механики. Любой из этих вариантов представляет чрезвычайный интерес. Похоже, в современном семействе «фундаментальных» частиц, включенных в стандартную модель, действительно есть кое-что новенькое.

Глава 8. В поисках теории всего

Чтобы понять структуру нашей Вселенной на самом глубоком уровне, физики ищут ответы на все вопросы и решают все загадки. Мы никогда не перестаем спрашивать почему:

Почему это случилось?

Из-за такого-то и такого-то эффекта.

Что вызвало этот эффект?

Взаимодействие этого тела вон с тем.

Почему они вступили во взаимодействие?

Потому что они оказались под влиянием такой-то и такой-то силы.

Каково происхождение этой силы?

И так далее. Однако, в отличие от детей, мы не можем удовольствоваться типичной отговоркой раздраженных родителей: «Потому что так повелел Бог!» Конечно, многие ученые верят в Бога, но это вряд ли хоть когда-то мешает им искать ответы на самые фундаментальные вопросы в их области исследования.

Физиков-теоретиков, однако, закапываться все глубже и глубже в сложные механизмы природы толкает не только жажда знаний. Они также ищут в природе различные паттерны и

закономерности, которые проявляются в простоте и красоте математических уравнений. Некоторые великие умы порой даже отвергали теорию, если математика в ней была слишком уродливой или неуклюжей! При этом они могли сказать что-нибудь вроде: наверное, здесь что-то не так, природа точно не могла создать такую нелепицу. Если вы не математик и не физик, такая причина отказа от теории может показаться вам нелогичной, однако это работает. Поиски величайшей истины всегда являются поисками красоты и простоты. Кажется, что множество феноменов, которые мы наблюдаем вокруг, будь то на Земле или в свете далеких звезд, в конце концов объясняются удивительно малым количеством фундаментальных теорий. Вся классическая механика объясняется ньютоновскими законами о движении и силах, а теории относительности Эйнштейна развивают их; электричество и магнетизм представляют собой два проявления одной и той же электромагнитной силы; а поведение всех субатомных частиц, разумеется, объясняет квантовая механика.

Итак, физикам XX века нужно было не просто найти и классифицировать все фундаментальные частицы. Им необходимо было понять, почему эти частицы взаимодействуют друг с другом и каково происхождение возникающих между ними сил. А если во взаимодействии участвует несколько сил, то одинаково ли их происхождение? Квантовая механика 1920-х годов была лишь первым шагом к этому. Следовательно, история прогресса атомной и ядерной физики и физики частиц, которую я рассказывал в предыдущей главе, неполна. Ведь в своем стремлении проникнуть в сущность материи и обнаружить ее фундаментальные кирпичики физики также не забывали искать в своих теориях простоту и симметрию. Священным Граалем физики стала величайшая теория всего, всемогущая теория, которая объясняла бы все естественным образом происходящие во Вселенной явления^[58].

В этой главе мы увидим, какие продвижения были сделаны в этом направлении, и попытаемся понять, приближаемся ли мы наконец к открытию этой теории.

Квантовая теория света

До сих пор я упоминал корпускулярно-волновой дуализм только в отношении квантовых объектов, например электронов, которые ведут себя, как волны, когда мы за ними не наблюдаем, и как частицы, когда наблюдение установлено. Но волнообразный аспект связан с волновой функцией, а мне не хочется снова повторять противоречивые рассуждения о физическом смысле волновой функции. Когда речь идет о свете (и всех остальных формах электромагнитного излучения), волновой аспект довольно реален. У нас как будто появляется выбор считать свет физической волной или физическими частицами, в зависимости от того, как мы на него смотрим и какой феномен изучаем.

На самом деле появление квантовой механики не заставило физиков забыть о классической волновой теории света. Эта теория, во второй половине XIX века предложенная шотландцем Джеймсом Клерком Максвеллом, заключается в наборе уравнений, которые носят его имя. Максвелл показал, что свет состоит из комбинации электрического и магнитного полей, колеблющихся под прямыми углами друг к другу и распространяющихся на скорости 300 000 километров в секунду.

Важно отметить, что уравнения Максвелла согласуются со специальной теорией относительности. В отличие от уравнений движения Ньютона, которые необходимо модифицировать с учетом теории относительности, чтобы они давали верные результаты на скоростях, близких к скорости света, уравнения Максвелла верны сразу. Само собой, теория, которая описывала бы движение на скорости света (то есть движение самого света) и не сходилась бы при этом со специальной теорией относительности, привела бы к возникновению своего рода дилеммы. Напротив, квантовая механика в трактовке Гейзенберга и Шрёдингера со специальной теорией относительности не сходилась. Она могла лишь

описывать поведение квантовых сущностей, например электронов, скорость движения которых гораздо ниже скорости света. Таким образом, подобно тому как движение классического тела, к примеру планеты или футбольного мяча, можно точно описать уравнениями Ньютона, но при приближении его скорости к скорости света требуются поправки, уравнение Шрёдингера тоже применимо только к медленно движущимся квантовым объектам. На релятивистских скоростях специальная теория относительности показывает, как величины, включая массу, импульс и энергию тела, начинают меняться. Следовательно, в крайнем случае значения этих величин в уравнении Шрёдингера необходимо заменить их релятивистскими версиями.

Объясню на примере, что это за собой влечет. Масса объекта косвенно указывает на содержащееся в нем количество «вещества». На самом деле в повседневной речи понятия массы и веса обычно взаимозаменяемы^[59]. Таким образом, мы считаем массу постоянной величиной, которая не изменяется из-за движения тела. Однако специальная теория относительности гласит, что при приближении скорости тела к скорости света его масса начинает расти, пока на скорости света не становится бесконечной – именно поэтому ни один объект, обладающий массой в покое, не может перемещаться на скорости света. Всего через год после публикации оригинального уравнения Шрёдингера его независимо друг от друга переформулировали с учетом этих изменений Оскар Клейн и Уолтер Гордон, а также сам Шрёдингер. Но в новом уравнении обнаружилась довольно серьезная проблема: квантовые вероятности, которые оно предсказывало на основании волновой функции, могли принимать отрицательные значения! Как вообще понять фразу, что у электрона есть минус двадцать процентов вероятности оказаться в конкретном месте?

В 1928 году Поль Дирак опубликовал статью под заголовком «Квантовая теория электрона», в которой предложил альтернативное уравнению Шрёдингера уравнение. Оно не только было «полностью релятивистским», но и естественным образом учитывало спин электрона (а это было в то время очень важно, если с помощью этой теории планировалось объяснять новые экспериментальные результаты). Именно это уравнение привело Дирака к теоретическому предсказанию античастиц^[60] и идее о рождении и аннигиляции пары электрон-позитрон.

Годом раньше, в 1927-м, Дирак также опубликовал прорывную статью, комбинирующую квантовую механику с теорией света Максвелла и предлагающую первую квантовую теорию фотона. В ней он «проквантовал» электромагнитное поле.

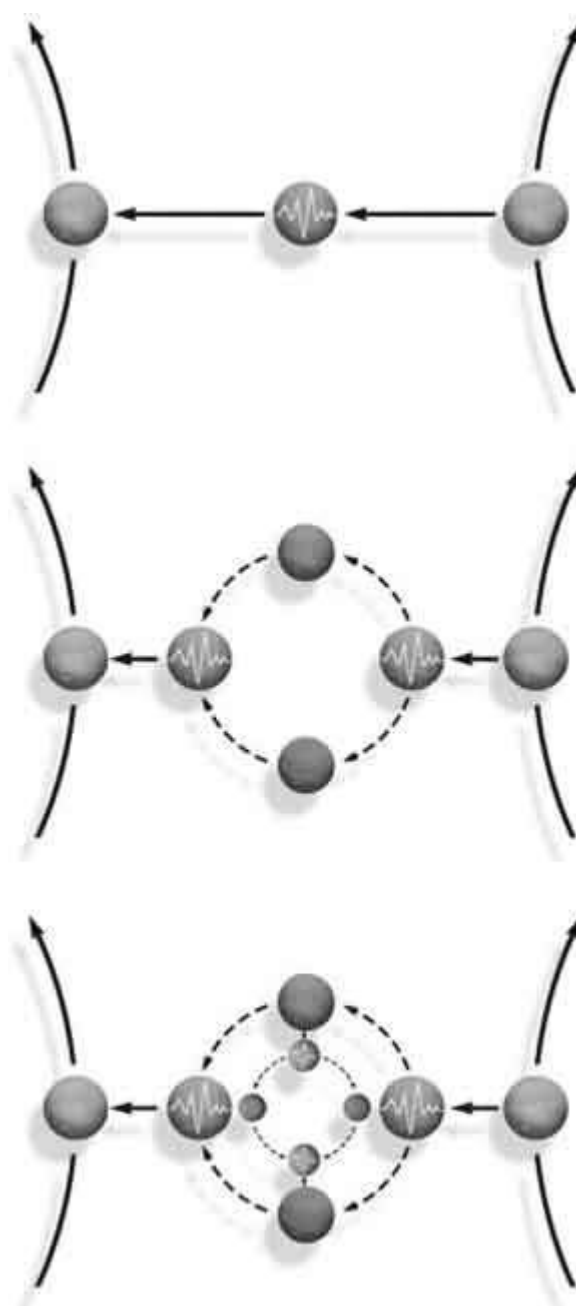
Затем он выяснил, как совместить две этих теории, одна из которых описывала электрон, а другая – фотон. В результате появилась теория квантовой электродинамики. Она стала первым примером так называемой квантовой теории поля и объяснила, как именно электроны испускают и поглощают фотоны, а также как два электрона отталкиваются друг от друга, обмениваясь фотоном.

Несмотря на многообещающее начало, в 1930-х и 1940-х квантовой теории поля пришлось нелегко, когда она столкнулась со множеством математических трудностей. Видите ли, в отличие от старой квантовой механики, она позволяла постоянное рождение и гибель виртуальных частиц – не забывайте, именно это получается при объединении принципа неопределенности Гейзенберга с уравнением Эйнштейна $E=mc^2$. Это означает, что определенные расчеты с применением теории приводили к бесконечным ответам. Я могу объяснить это на пальцах. Основная идея квантовой теории поля заключается в том, что нечто вроде электрического поля можно представить в виде множества виртуальных фотонов, которые все время то рождаются, то вновь исчезают. Следовательно, происходящий между двумя электронами обмен фотоном – это лишь простейший из возможных процессов. Изучая все более короткие расстояния, мы обнаружим, что на самом деле происходит гораздо больше. Например, этот виртуальный фотон по пути от одного электрона к другому может вдруг превратиться в виртуальную пару электрон-позитрон, которая быстро аннигилирует и

вернет изначальный фотон на место, прежде чем он достигнет точки своего назначения. Однако за краткий период существования виртуальных электрона и позитрона они также смогут обменяться виртуальным фотоном, в результате чего могут родиться новые электрон и позитрон – и так далее. Остается лишь надеяться, что при расчетах вероятность этой более сложной активности можно игнорировать или она хотя бы будет становиться все менее значительной, однако это не так. При расчетах она приводит к бесконечным результатам.

На самом деле эта проблема существовала задолго до появления квантовой механики. В XIX веке физики ломали голову над следующим вопросом. Электрический заряд генерирует вокруг себя электрическое поле, но как нам рассчитать, какой эффект это поле оказывает на заряд, который его сгенерировал? Эта проблема возникает только в том месте, где расположен заряд, но и здесь при расчете мы получим бесконечный результат. Это объясняется необходимостью поделить определенную величину на расстояние между интересующей нас точкой и местоположением заряда. В нашем случае расстояние равняется нулю. А деление на ноль дает бесконечность.

Эти проблемы с бесконечностью, которые преследовали квантовую теорию поля, в конце концов были решены в 1949 году, когда трое физиков, Ричард Фейнман, Джулиан Швинглер и Синъитиро Томонага, независимо друг от друга нашли способ избавиться от бесконечностей при помощи математического фокуса, называемого «перенормировкой». В итоге появилась теория, которая по сей день считается самой точной в науке. Она до сих пор называется квантовой электродинамикой – или КЭД, – и сегодня многие физики при использовании этого термина имеют в виду именно ее. Однако не стоит забывать, что сначала, двадцатью годами ранее, КЭД предложил Поль Дирак.



Квантовая теория поля описывает взаимодействие двух электронов, учитывая серию гораздо более сложных, но менее вероятных процессов, которые могут произойти. Процесс «низшего порядка» представляет собой обмен единственным виртуальным фотоном (вверху). Процесс более высокого порядка предполагает, что в ходе этого обмена один из электронов испустит фотон, который по пути к другому электрону создаст пару электрон-позитрон. Эта пара быстро аннигилирует и снова создаст фотон, который и будет поглощен вторым электроном (посередине). Есть даже небольшая вероятность (внизу), что пара электрон-позитрон, рожденная фотоном в процессе обмена, сама обменивается виртуальным фотоном, который также создаст пару электрон-позитрон, – и так далее.

КЭД соответствует экспериментальным измерениям с точностью до одной стомиллионной. Но не думайте, что это просто удачное описание того, как электрически заряженные частицы чувствуют присутствие друг друга, обмениваясь фотонами. Эта теория природы взаимодействия света и материи является наиболее фундаментальной и важной во всей науке. Все механические, электрические и химические законы и феномены основываются

именно на ней. Кроме гравитации и сил, действующих внутри атомного ядра, все природные процессы в итоге объясняются КЭД: как атомы водорода и кислорода объединяются в молекулу воды, какова природа солнечного света, как изображение этой страницы появляется на экране ноутбука, пока я печатаю текст, и как электрические сигналы моего мозга преобразуются в механические рефлексy, контролирующие движения моих пальцев, нажимающих на кнопки клавиатуры.

Мы видим, что КЭД лежит в основе всей химии (а следовательно, и биологии), ведь на фундаментальном уровне она сводится к тому, как атомы взаимодействуют через электроны, а это происходит благодаря электромагнитной силе, представляющей собой не что иное, как обмен фотонами.

Некоторым физикам, включая и самого Дирака, не понравилось, как фокус с перенормировкой позволил избавиться от бесконечностей. В математическом отношении казалось, что неудобные части теории просто смели под ковер. Так что, хотя итоговая теория и оказалась очень точной, пуристам вроде Дирака всегда казалось, что необходимости в перенормировке вообще не должно возникать, и они не прекращали поиски чего-то более фундаментального.

Последние полвека основная цель исследователей фундаментальной физики была гораздо более масштабной. Несмотря на свой успех, КЭД объясняет лишь одну из четырех сил природы. Возможно ли описать остальные три силы (гравитацию и два ядерных взаимодействия) с помощью квантовой теории поля – то есть используя идею об обмене квантовыми частицами? Более того, существует ли единая квантовая теория поля, которая справилась бы со всем разом?

Калибровочные теории и симметрии

Используя в обычной жизни слово «симметричный», мы, как правило, имеем в виду довольно специфическую вещь: что объект или силуэт выглядит точно так же, как его зеркальное отражение, или при осмотре под разными углами. Но в математике идея симметрии имеет гораздо более важное значение. Именно она помогла физикам в стремлении объединить силы в квантовую теорию поля.

В более общем смысле симметрия проявляется, когда какое-то свойство остается неизменным при изменении другой величины. Сфера выглядит одинаково под любым углом, а разница в возрасте между двумя людьми не изменяется с течением времени. Оба этих примера представляют собой различные формы симметрии. Физики говорят о «глобальной» симметрии, когда определенные законы физики остаются неизменными после применения повсюду определенных изменений, или «трансформаций». Некоторые физические теории характеризуются даже более изящными свойствами. К примеру, уравнения Максвелла, составляющие классическую теорию электромагнетизма, остаются неизменными, даже при «локальных» изменениях (когда в различных местах изменения различаются). Это связано с тем, что электрическое и магнитное поля в некотором роде эквивалентны друг другу.

Чтобы увидеть это, давайте представим потенциальную электрическую энергию, ощущаемую электроном, в качестве холмистой местности, где долины символизируют притяжение, так как электрон будет скатываться в них, а холмы – отталкивание, так как, если поместить электрон на вершину одного из них, он тотчас скатится вниз. Если изменить ландшафт в одном месте, скажем превратив долину в холм, то калибровочная симметрия велит электрону вести себя точно так же, как он вел бы себя до изменений, то есть подкатиться к холму. Но для этого электрону необходимо компенсирующее изменение потенциальной магнитной энергии. Теорию электромагнетизма называют калибровочной теорией с локальной симметрией.

Оказывается, КЭД тоже обладает этим свойством. На самом деле было открыто, что квантовая теория поля, описывающая любую из четырех сил природы, должна обладать такой калибровочной симметрией. Это дало физикам надежду, что силы, возможно, каким-то образом связаны друг с другом.

Понимаю, все это кажется довольно сложным, но я упомянул об этом не без причины. Важна здесь идея «нарушения» симметрии. Чистый лист бумаги под некоторыми углами симметричен: он одинаково выглядит с обеих сторон и вверх ногами. Но как только вы начинаете на нем писать, симметрия пропадает, или нарушается.

В течение 1960-х годов физики использовали аргумент симметрии, чтобы расширить КЭД и включить в нее, помимо электромагнитной силы, слабое ядерное взаимодействие, которое отвечает за ядерный бета-распад. Было обнаружено, что при определенных условиях слабое ядерное взаимодействие тоже можно представить в форме обмена виртуальными частицами вроде фотонов. А если отдельные симметрии и нарушались, можно было снова прибегнуть к старому фокусу с перенормировкой, чтобы квантовая теория поля для слабого взаимодействия имела смысл. К концу 1960-х годов Стивен Вайнберг, Абдус Салам и Шелдон Глэшоу разработали расширенную теорию поля, которая объединила электромагнитную силу и слабое ядерное взаимодействие. Эта теория получила название «теории электрослабого взаимодействия».

Они объяснили, что при температуре выше миллиона миллиардов градусов, какая должна была наблюдаться на заре существования Вселенной, электромагнитная сила и слабое взаимодействие стали бы одной и той же силой. Но по мере остывания и расширения Вселенной определенная симметрия оказалась нарушена, из-за чего возникли две очень разные силы. Сегодня мы считаем, что слабое взаимодействие возникает в результате обмена частицами, обозначаемыми буквами «W» и «Z». Если точнее, они называются «слабыми векторными бозонами», но называть их W – и Z-бозонами гораздо проще.

Цветная сила

Как только было обнаружено, что идея калибровочной симметрии применима к квантовым теориям поля, прогресс в понимании таким образом сильного ядерного взаимодействия не заставил себя ждать. Само собой, Юкава проложил дорожку в этом направлении многими годами ранее, когда предложил свою теорию пиона – частицы, которую можно представить предметом обмена между нуклонами внутри ядра. Но как только было открыто, что нуклоны сами состоят из кварков, ученые поняли, что сила обмена тоже должна действовать на более глубоком уровне. Разработанная в итоге теория поля сильного ядерного взаимодействия стала называться «квантовой хромодинамикой», или КХД.

Задумайтесь, что на самом деле представляет собой электрический заряд. На фундаментальном уровне нам не остается ничего иного, кроме как сказать, что это свойство определенных элементарных частиц, для которого характерны два типа, называемые положительным и отрицательным. Частицы с противоположными типами заряда притягиваются друг к другу, а одинаково заряженные частицы отталкиваются. В принципе, мы могли бы назвать два заряда сладким и кислым. Частица со сладким зарядом в таком случае притягивалась бы к частице с кислым зарядом. В общем, идею вы поняли: положительность или отрицательность электрического заряда представляет собой лишь выдуманное понятие.

Для свойства подверженных сильному ядерному взаимодействию частиц тоже нужно было подобрать подходящее название, и поэтому их наделили «цветным» зарядом. Чтобы объяснить модель кварков, а именно наличие в каждом нуклоне именно трех кварков, должно было существовать три типа этого заряда сильного взаимодействия. Цветовую аналогию выбрали из-за связи с тем, как комбинируются различные цвета света. Отсюда и

происхождение названия этой теории: приставка «хромо-» происходит от греческого слова *chroma*, которое означает «цвет». Три типа цветных зарядов называли красным, синим и зеленым. Красный, синий и зеленый кварк могут объединяться для создания чего-то бесцветного. Правило гласит, что кварки не могут существовать поодиночке, поскольку они обладают цветом, а позволены лишь бесцветные комбинации. Это напоминает более раннее обсуждение природы атомов, которые должны содержать равное количество положительного и отрицательного заряда, чтобы быть электрически нейтральными. Однако в этом случае природа хотя бы позволяет атомам терять или приобретать электроны и таким образом существовать в качестве положительных или отрицательных ионов.

Хотя отдельные кварки существовать не могут, в настоящее время ведутся глубокие исследования создания так называемой кварк-глюонной плазмы, или отдельных кварков и обменных частиц, именуемых глюонами. Эти типы частиц возникают, когда два тяжелых ядра сталкиваются при очень высоких энергиях. На долю секунды границы между протонами и нейтронами внутри двух ядер пропадают и возникает бульон из свободных кварков и глюонов, который очень быстро «замерзает» в форме различных адронов. Считается, что очень высокая температура и плотность, которые необходимы для создания этой плазмы, были характерны для нашей Вселенной сразу после Большого взрыва.

Стоит упомянуть, что о фокусах цветового объединения кварков внутри адронов думали еще до появления квантовой хромодинамики. Важное различие между КЭД и КХД заключается в том, что в КЭД существует лишь один переносчик силы – фотон. В КХД есть восемь разных типов обменных частиц цветной силы, или глюонов, которые определяют различные способы взаимодействия цветных кварков. В предыдущей главе я описал, как Юкава предположил, что в ходе обмена между двумя нуклонами пион представляет собой фундаментальную частицу – переносчик силы. Мы видим, что на более глубоком уровне истинными переносчиками сильного взаимодействия выступают глюоны.

Итак, подобно тому как теория электрослабого взаимодействия описывает взаимодействие частиц посредством обмена переносящих силу фотонов или W – и Z -бозонов, КХД представляет собой квантовую теорию поля, описывающую обмен кварков глюонами.

Однако амбициозная цель объединения сил еще не достигнута. В то время как физики успешно скомбинировали в одной теории электромагнитную силу и слабое ядерное взаимодействие, они до сих пор не сумели объединить теорию электрослабого взаимодействия с КХД, хотя обе они представляют собой квантовые теории поля. Можно сказать, что схема их объединения существует, однако ее только предстоит проверить экспериментальным путем. До этого физикам частиц приходится пользоваться аппаратом, который включает в себя в качестве «стандартной модели» и теорию электрослабого взаимодействия, и КХД. Этот аппарат прекрасно работает, однако никто не верит, что он представляет собой последнее слово в этом отношении.

Великое объединение

Можно достичь тех пределов, где различные силы становятся едины, изучая все более и более короткие отрезки. КЭД гласит, что электрон всегда окружен облаком виртуальных фотонов, а также виртуальных пар электрон-позитрон, которые постоянно появляются и исчезают вновь. Вся эта активность маскирует электрический заряд электрона и в итоге производит лишь тот заряд, который мы видим. Такими словами можно описать, как перенормировка справляется с бесконечностями. Здесь в роли бесконечности выступает сам заряд электрона, но он начинает расти, только когда мы увеличиваем масштаб, пробиваясь сквозь окружающую его вуаль виртуальных частиц.

Становясь все ближе к источнику электромагнитной силы, мы узнаем, что эта сила растет. С двумя ядерными силами – которые гораздо сильнее электромагнитной в диапазоне своего действия (внутри ядра) – происходит противоположное: на более коротких отрезках эти две силы становятся слабее. Когда мы достигаем расстояния (10–28 миллиметра), которое столь же мало в сравнении с размером протона, как протон мал относительно нас, мы обнаруживаем, что все три силы равны по модулю. Именно здесь они снова могут считаться одной силой и восстанавливается определенная симметрия.

Способная объединить три этих силы теория называется теорией великого объединения. Физики уже довольно давно пытаются вывести такую теорию, в которой бы все вставало на свои места. Она смогла бы заменить менее удобную стандартную модель, которая представляет собой небрежную комбинацию теории электрослабого взаимодействия и КХД. В 1970-х годах была решена особенно трудная проблема о том, что делать с масштабом, когда все три силы становятся равными. В той точке приближения, когда электромагнитная сила и слабое ядерное взаимодействие оказываются равными и в дело вступает электрослабая сила, сильное ядерное взаимодействие еще слишком сильно и симметрия остается нарушенной. Для истинной симметрии все три должны сравняться одновременно.

Тогда был открыт новый тип симметрии, который оказался еще более функциональным, чем тот, что был необходим для объединения электромагнитной силы и слабого ядерного взаимодействия. Он получил название «суперсимметрии» и стал математическим способом решения этой проблемы. По сути, он показывает симметрию, или связь, между электронами, нейтрино, фотонами и W – и Z -бозонами (частицами, описываемыми теорией электрослабого взаимодействия) с одной стороны и кварками и глюонами (частицами КХД) – с другой. Его основное предсказание заключается в том, что каждая из известных частиц имеет «суперсимметричного» партнера с противоположным характером. Следовательно, электрон соотносится с сэлектроном (бозоном), а фотон – с фотино (фермионом). Суперсимметрия также предсказывает, что протон может распадаться на позитрон и пион. Если бы этот процесс можно было засечь в природе, он стал бы убедительным свидетельством в пользу теории великого объединения. Пока распад протона не наблюдался, но, учитывая его редкость, всегда остается шанс, что его просто еще не успели заметить. Мы просто пока не знаем, можно ли сказать, что поведение природы суперсимметрично. Но, возможно, суперсимметрии уготована более фундаментальная роль и ей найдется применение в теории, на фоне которой все теории великого объединения покажутся незначительными.

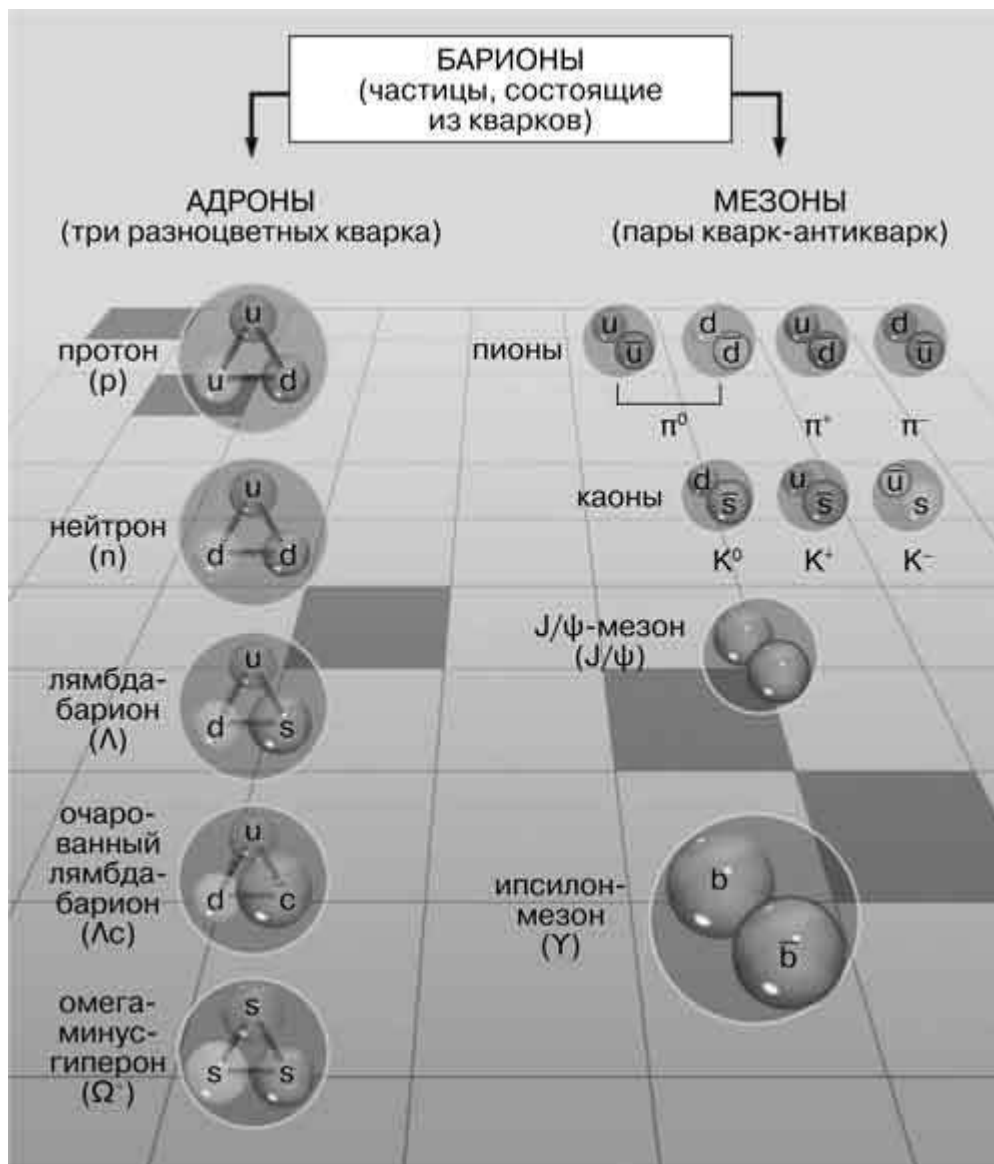
Что насчет гравитации?

Мы ни о чем не забыли? Кажется несколько грубым, а то и вовсе неприемлемым называть объединение великим, если соответствующие теории намереваются включить в себя лишь три из четырех сил природы. Пока что я воздерживался от комментариев по поводу гравитации и ее места во всей этой картине. Не то чтобы никто не пытался вписать ее сюда – Эйнштейн, к примеру, посвятил последние тридцать лет жизни попыткам найти теорию поля, которая объединила бы электромагнетизм с гравитацией, но все его усилия оказались тщетными.

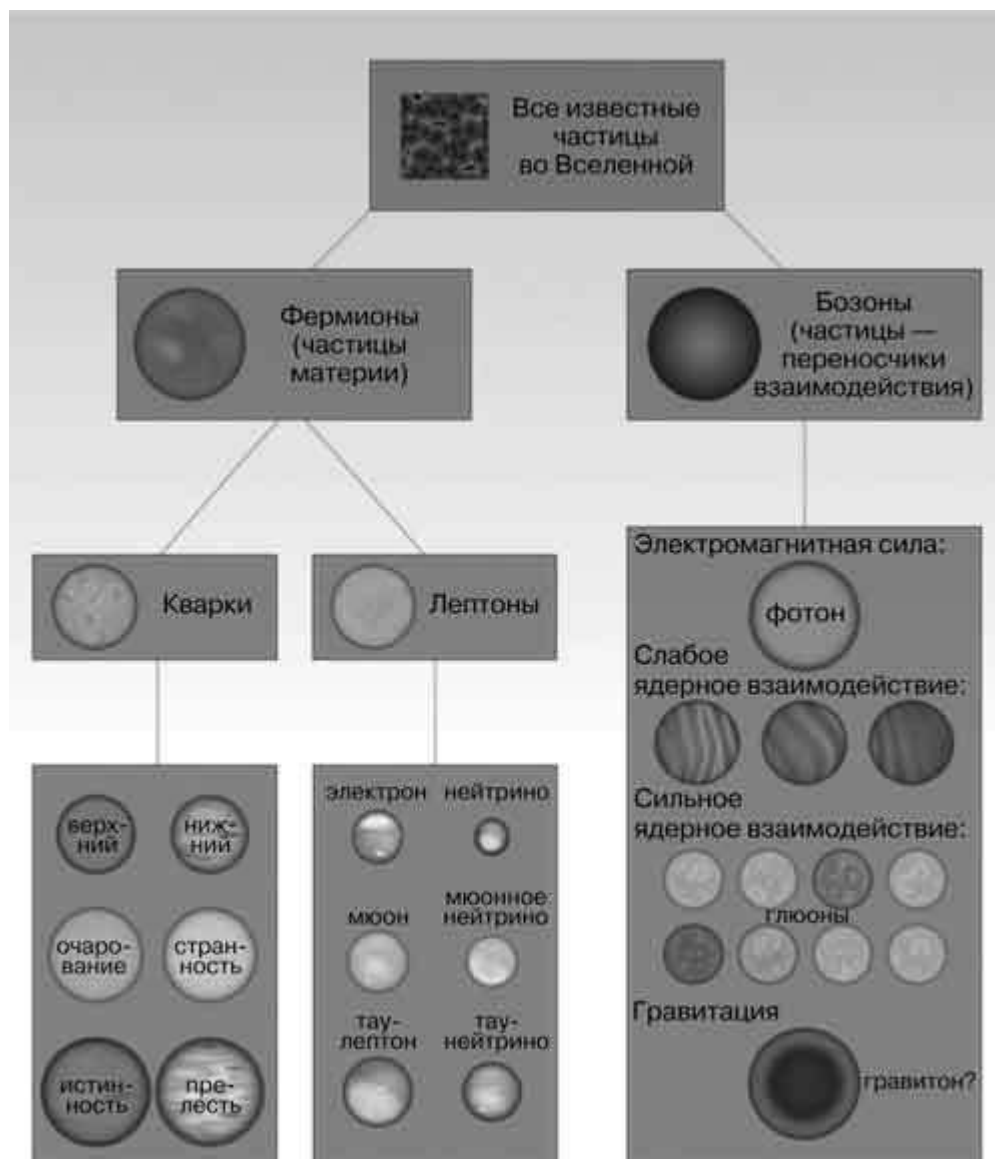
В некотором роде жалеть гравитационную силу не стоит. В конце концов, она описывается теорией, которую кое-кто считает более красивой, более применимой, даже более фундаментальной, чем любая квантовая теория поля, а именно общей теорией относительности. (Трубите, трубы, бейте, барабаны, и все такое.)

В своей специальной теории относительности Эйнштейн доказал, что абсолютного пространства и времени не существует, так как для двух наблюдателей расстояния и временные интервалы различаются. Разобраться в этом мы можем, только объединив пространство и время в четырехмерное пространство-время. В 1915 году Эйнштейн закончил работу над своим главным вкладом в науку. Общая теория относительности расширила

специальную теорию, включив в нее гравитацию. Однако описание этой силы оказалось как нельзя меньше похоже на картину обмена частицами, которую дала нам для описания трех остальных сил квантовая теория поля. Эйнштейн описал гравитацию чисто геометрически. Все во Вселенной пытается притянуть все вокруг ближе. Но гравитационная сила в общей теории относительности объясняется кривизной самого пространства-времени. Чем больше масса тела, тем сильнее оно искривляет пространство и время вокруг себя.



Небольшая выборка барионов. Это частицы, которые состоят из кварков и подвержены сильному ядерному взаимодействию посредством обмена глюонами. Адроны состоят из трех разноцветных кварков, сдерживаемых глюонами. Мезоны представляют собой пары кварк-антикварк.



Все элементарные частицы можно разделить на две категории: частицы материи (фермионы) и частицы взаимодействия (бозоны).

Эксперименты доказали, что общая теория относительности поразительно верна. На сегодняшний день это лучшая теория природы пространства и времени – и копает она очень глубоко!

Теперь физики понимают, что для объединения четырех сил природы им необходимо найти способ объединить общую теорию относительности с квантовой теорией поля (а иначе говоря, с квантовой механикой)^[61]. Проблема заключается в том, что две этих теории не имеют почти ничего общего, за исключением того факта, что на повседневном уровне они обе сводятся к ньютоновской физике. Они отклоняются от этой стартовой точки в разные стороны – одна занимается очень маленькими объектами и расстояниями (квантовая механика), а другая имеет дело с очень большими объектами и расстояниями (общая теория относительности). Но их математический аппарат очень сильно различается, что и делает их несовместимыми.

Тем не менее к концу XX века уже вовсю шли поиски теории всего, теории квантовой гравитации.

Урок Планка

Сегодня поиски теории квантовой гравитации, которая объединила бы все четыре силы, представляют собой чрезвычайно интересную область теоретических исследований. В оставшейся части этой главы я опишу связанные с ней основные идеи.

Занимающихся этой темой ученых можно условно разделить на два лагеря. Один лагерь утверждает, что квантовая механика содержит более фундаментальные идеи, поэтому начинать нужно с нее и искать способ включить в нее общую теорию относительности. Другой лагерь настаивает на обратном и предпочитает отталкиваться от общей теории относительности, включающей фундаментальные понятия пространства и времени, и пытается проквантовать ее. Само собой, есть и другие мнения: ряд физиков полагает, что ни одна из теорий не сможет пережить столкновения и обе нужно будет подвергнуть серьезным операциям, прежде чем они смогут быть объединены в теорию квантовой гравитации. Более маленькая группа мыслителей даже считает, что по-хорошему нужно отбросить в сторону и квантовую механику, и общую теорию относительности и начать все с нуля. Но так как каждая из теорий отлично работает в своей сфере, сложно поверить, что в них не содержится фундаментальной истины о природе мира.

Как минимум в одном все теоретики квантовой гравитации сходятся: не стоит забывать об уроке, который нам сто лет назад преподавал Планк. Он запустил квантовый снежный ком, предположив, что энергия не может бесконечно делиться, а состоит из неделимых сгустков, или квантов, подобно тому как материя состоит из мельчайших кирпичиков. Теперь теоретики квантовой гравитации понимают, что пространство и время тоже должны состоять из неделимых сгустков. Масштаб длины и времени, на котором должно происходить это квантование, в честь отца-основателя идеи называется масштабом Планка. Именно на этом масштабе – который можно считать как масштабом расстояния, так и масштабом энергии/температуры – и объединяются все силы.

Так каков же размер самой маленькой единицы пространства, кванта объема? Давайте дадим контекст: в одном стакане воды содержится больше атомов, чем число стаканов воды, которое необходимо, чтобы наполнить все моря и океаны мира. Так что атомы очень малы. Далее, в пространство, которое занимает один атом, можно уместить тысячу миллиардов атомных ядер. Так что ядра гораздо меньше. Далее – глубокий вдох, – атомное ядро может вместить в себя столько квантовых объемов, сколько кубических метров входит в галактику Млечный Путь (приблизительно 10^{62} м^3). А нашу галактику тесной не назвать: она простирается на восемьдесят тысяч световых лет и содержит сотню миллиардов звезд. Такое сложно себе даже представить.

Раз это самая маленькая единица пространства, нет смысла даже говорить о том, чтобы поделить ее надвое.

Что насчет продолжительности квантовой единицы времени? Она так мала, что я даже не могу придумать подходящую аналогию, чтобы вас удивить. Достаточно сказать, что в одной секунде содержится гораздо больше квантов времени (10^{43}), чем количество секунд, прошедших с момента рождения Вселенной (менее 10^{18}).

Теория струн

Большая часть теоретиков квантовой гравитации принадлежит к тому лагерю, который пытается отталкиваться от квантовой механики. Они утверждают, что с помощью квантовых идей, включая квантовую теорию поля и суперсимметрию, мы сумели так далеко зайти в понимании трех из четырех сил природы с позиции квантовой механики, что гравитацию тоже можно объяснить подобным образом. На самом деле они разрабатывают так

называемую теорию струн, которая делает именно это. Она описывает гравитацию с позиции обменной частицы, называемой гравитоном. Но теория струн, как подсказывает нам ее название, существенным образом отличается от более ранних квантовых теорий поля. Она утверждает, что все фундаментальные частицы в действительности представляют собой крошечные вибрирующие струны. Разные частоты их вибрации обуславливают существование различных элементарных частиц.

Оригинальная версия теории струн была основана на идеях, развитых в 1968 году Габриеле Венециано. Но в его теории наблюдался целый ряд проблем: в частности, она предсказывала существование частиц, движущихся быстрее света, называемых тахионами, но физики уже не допускали такой возможности. Затем в середине 1980-х годов произошла первая революция струн. Джон Шварц и Майкл Грин опубликовали знаковую статью, в которой применили идею суперсимметрии к струнам Венециано, таким образом решив все проблемы теории. Ее новая версия стала называться теорией суперструн и тут же была провозглашена наконец обретенной теорией всего.

Однако вскоре воодушевление прошло, и развитие теории суперструн существенно замедлилось. Это объяснялось двумя причинами. Во-первых, математика этой теории была так сложна, что никто просто не понимал значения уравнений. Было даже заявлено, что некоторые математические методы, необходимые для должного решения уравнений, еще не изобретены! Вторая проблема оказалась более печальной. К 1990-м годам существовало уже пять разных версий теории струн, и никто не мог назвать среди них верную. Эта область исследований в некотором роде стагнировала, и экспертам стало сложно склонять подающих надежды студентов присоединяться к ним и работать над докторскими диссертациями в соответствующей сфере. Теория струн как будто потеряла очарование.

А в 1995 году случилась вторая революция струн. Была предложена новая, еще более масштабная схема, которая собрала под своей крышей различные теории суперструн. Ее называют «М-теорией», где «М» означает «мембранная». М-теория предсказывает, что фундаментальными сущностями нашей Вселенной являются не только струны, но и двумерные плоскости, или мембраны, а также трехмерные пузыри. Но пока никто даже не представляет, как выглядят уравнения М-теории, а многие и вовсе считают, что «М» означает «мистическая». Известно, что, согласно предсказаниям М-теории, мы на самом деле живем в 10-мерном пространстве (и дополнительное измерение времени делает его 11-мерным пространством-временем). Однако шесть или семь измерений пространства свернуты в очень маленькие сущности, к которым мы не можем получить доступ с помощью современных ускорителей частиц. Они затеряны среди струн и мембран.

Урок Эйнштейна

Более маленькая группа исследователей, чем сторонники теории струн, работает в другом направлении. Они отталкиваются от общей теории относительности и модифицируют ее, надеясь обнаружить квантовую теорию пространства-времени. Ряд ученых полагает, что они нашли верный способ. Их теория называется «петлевой квантовой гравитацией», и последние пару десятилетий в ней наблюдается стабильный прогресс. Петлевая квантовая гравитация также предсказывает, что в масштабе Планка пространство и время состоят из неделимых сгустков. Существенное отличие от теории струн заключается в том, что в последней пространство и время считаются лишь фоном – своего рода сценой, на которой танцуют струны, – но петлевая квантовая гравитация идет вразрез с одним из центральных столпов теории Эйнштейна, который гласит, что пространство и время можно описать только с позиции взаимодействия между различными событиями. Проще говоря, это равносильно утверждению, что расстояние между двумя точками существует только потому, что существуют сами точки.

Петлевая квантовая гравитация отталкивается от верной картины пространства и времени. Ее «петли», в отличие от суперструн, не являются физическими сущностями. Реальны лишь взаимодействия между петлями. К несчастью, с предсказанием свойств всех четырех сил в единой форме петлевая квантовая гравитация не справляется.

Быть может, чтобы построить мост между квантовой механикой и общей теорией относительности, нужно приложить немало усилий. А может, ключ содержится в М-теории. Нам остается лишь наблюдать.

Подчеркивая отрицание

Пол Дэвис, профессор натурфилософии, Университет Маккуори, Сидней

Когда в 1974 году Стивен Хокинг объявил, что черные дыры на самом деле не черные, а излучают тепло и медленно испаряются, люди начали гадать, откуда появляется энергия тепла. Раз черная дыра все поглощает, откуда же она берет энергию для подпитки теплового излучения? Ответ на этот вопрос вскоре нашелся. Излучаемое черной дырой тепло обеспечивается не энергией, выходящей из дыры, а отрицательной энергией, входящей в нее.

Простыми словами, отрицательное энергетическое состояние представляет собой состояние с меньшим количеством энергии, чем состояние с нулевым гравитационным полем. Но как можно обладать меньшей массой, или энергией, чем абсолютно пустое пространство? Секрет кроется в квантовой механике – или, точнее, в квантовой теории поля. Согласно этой теории, кажущееся пустым пространство на самом деле пустым не является – в нем кишат всевозможные «виртуальные» частицы, которые существуют лишь мимолетно. Так называемое состояние квантового вакуума невозможно освободить от этих бесчисленных призрачных сущностей, хотя они и не обладают измеряемой энергией, а следовательно, совсем не имеют силы притяжения. И действительно, виртуальные частицы обнаруживают себя, только когда что-то нарушает квантовый вакуум.

Простой пример нарушения квантового вакуума дает знаменитый эффект Казимира, открытый в 1948 году. Два поставленных друг напротив друга зеркала заключают между собой некоторый объем квантового вакуума. Зеркала отражают реальные фотоны света, но также отражают и призрачные виртуальные фотоны. Это нарушает энергетический бюджет квантового вакуума, и при сведении баланса обнаруживается, что общее количество энергии модифицированного вакуумного состояния между зеркалами меньше, чем количество энергии немодифицированного состояния, где не задействованы зеркала, то есть пустого пространства. Таким образом, наличие параллельных зеркал опускает уровень энергии ниже уровня энергии пустого пространства, делая его отрицательным в понимании большинства людей. Эта отрицательная энергия проявляет себя в качестве измеримой силы притяжения между зеркалами. В 1970-х годах мы со Стивеном Фуллингем, используя квантовую теорию поля, открыли, что отрицательные энергетические состояния можно создавать и с помощью одного зеркала, если двигать его особым образом. Более того, наши расчеты показали, что отрицательная энергия будет удаляться от зеркала на скорости света, давая возможность появления пучка отрицательной энергии – в противоположность статической отрицательной энергии, связываемой с эффектом Казимира. Вскоре после этого было обнаружено, что смешанные лазерные пучки могут создавать краткие вспышки отрицательной энергии из так называемых сжатых состояний. Эти состояния недавно были продемонстрированы в лабораторных условиях.

Как только была открыта возможность течения отрицательной энергии, мы с Фуллингем сумели доказать, что излучение Хокинга подпитывается именно таким образом. На расстоянии излучение тепла представляет собой поток положительной энергии, вытекающей

из черной дыры. Однако мы знали, что этот поток энергии нельзя отследить до его истока внутри дыры, поскольку это бы нарушало правило, что ничто не может покинуть дыру. Мы обнаружили, что поток отрицательной энергии постоянно втекает в дыру из окружающей ее области. В результате непрерывного накопления отрицательной энергии внутри дыры ее масса уменьшается. Наши расчеты подтвердили, что черная дыра теряет массу-энергию именно с той скоростью, которая необходима для поддержания теплового излучения. Черные дыры, а на самом деле и все сферические объекты, создают рядом с собой отрицательную энергию квантового вакуума, поскольку искривление пространства-времени под действием их гравитационного поля нарушает активность виртуальных частиц. По одному из этих удачных совпадений, создаваемая при превращении звезды в черную дыру деформация пространства, как выяснилось, оказывает на квантовый вакуум математически идентичный акселерационному зеркалу эффект.

Теоретическая возможность создания потока отрицательной энергии – на практике пучка холода и тьмы вместо тепла и света – привела к появлению целого ряда странных и запутанных сценариев. Допустим, этот пучок направлен на горячий объект, отличный от черной дыры, например на печь, топка которой закрыта заслонкой. Казалось бы, содержимое печи должно потерять энергию и остыть. Однако это было бы явным нарушением прославленного второго закона термодинамики, поскольку потеря тепла печью была бы равносильна потере энтропии^[62], а второй закон запрещает снижение энтропии закрытой системы. (Сам пучок имеет нулевую энтропию.) Второй закон представляет собой основу термодинамики, и любое его нарушение приводит к появлению вечного двигателя, существование которого считается невозможным.

Еще один сценарий с участием отрицательной энергии тоже ведет к парадоксу – а именно, к существованию в пространстве кротовых нор, которые прославила Джоди Фостер в фильме «Контакт». Кротовые норы представляют собой гипотетические тоннели, или трубки, в пространстве, которые связывают отдаленные точки коротким путем. Если бы они действительно существовали, их можно было бы использовать в качестве машин времени. При определенных обстоятельствах астронавт, который прошел сквозь кротовую нору, вышел в отдаленной точке пространства и пошел обратно обычным путем, может вернуться домой еще до своего ухода! Следовательно, само существование кротовых нор ведет к парадоксу. Математические модели Кипа Торна и его коллег из Калифорнийского технологического института показали, что теоретически существование кротовых нор возможно, однако проходить по ним можно, только если возле их горловин будет создано некоторое отрицательное энергетическое состояние. Это необходимо, поскольку гравитация угрожает уничтожить кротовую нору, прежде чем через нее пройдет хоть что-то. Так как отрицательная энергия обладает отрицательной массой, она дает отрицательную гравитацию, противостоит пинч-эффекту и оставляет горловину открытой. Таким образом, неограниченная отрицательная энергия снова ведет к нефизичному парадоксу.

Хотя описанные парадоксы не по душе физикам-теоретикам, никто еще не доказал невозможность непрерывных потоков или ванн отрицательной энергии. Вопрос о том, могут ли, скажем, в квантовом вакууме храниться неограниченные запасы энергии, остается открытым.

Глава 9. Применение кванта

Надеюсь, теперь я убедил вас, насколько фундаментальна квантовая механика, которая лежит в основе столь многих областей современной физики и химии. Само собой, вы можете упрямыться и утверждать, что все это очень интересно, однако не имеет почти никакого отношения к повседневной жизни. В конце концов, мир наших ощущений и чувств слишком далек от всей квантовой странности, происходящей на микроскопическом уровне; вряд ли

она может оказывать непосредственное влияние на нас. Так что в этой главе мы узнаем, как некоторые идеи квантовой физики, описанные на этих страницах, в последние полвека были использованы для разработки технологий, которые мы сегодня принимаем как должное.

К примеру, определенное свойство волновых функций электрона – а именно, их подчинение принципу исключения Паули – объяснило, как электроны располагаются на энергетических «оболочках» атомов, а это привело к пониманию электропроводности металлов. Это, в свою очередь, подтолкнуло физиков к изучению полупроводниковых материалов и изобретению транзистора, на основании которого впоследствии появились микрочип, компьютер и Интернет.

Более того, CD – и DVD-плееры используют соответствующее свойство фотонов, подарившее нам лазер – устройство, которое нашло применение во множестве технических, медицинских и научных сфер, не говоря уж о сфере развлечений и отдыха.

Феномен квантового туннелирования дал нам ядерную энергию и однажды, надеюсь, приведет к появлению более чистого источника бесконечной энергии – ядерного синтеза.

Еще одно странное квантовое свойство определенных материалов, охлажденных почти до абсолютного нуля, дало нам сверхпроводники, которые однажды могут предоставить нам окончательное решение для консервации энергии – силовые кабели с нулевым электрическим сопротивлением.

Вы правда думаете, что в радиоактивности нет ничего хорошего? А что, если я скажу вам, что она произвела революцию в медицине? И как, по-вашему, работает датчик дыма?

Список очень велик, но я остановлюсь только на нескольких наиболее важных технологиях, которые непосредственно основаны на квантовой механике.

Эпоха микрочипа

Сегодня кажется, что все, от автомобилей до стиральных машин, от кофеварок до музыкальных открыток, содержит в себе микрочип. Но вы хоть раз задумывались, как этот чип работает?

В статье о принципе исключения Паули в Главе 7 я описал, как электроны располагаются внутри атомов, при условии что двум электронам не позволено занимать одно и то же квантовое состояние. Иначе говоря, они не могут описываться одной волновой функцией и в чем-то должны различаться: либо по энергии, либо по моменту импульса, либо по направлению спина. Это происходит потому, что электроны, как и другие основные кирпичики материи, кварки, принадлежат к классу элементарных частиц, называемых фермионами (в честь великого итальянского физика Энрико Ферми). Считается, что фермионы подчиняются принципу исключения и предпочитают держаться особняком, каждый в своем уникальном квантовом состоянии. Частицы-переносчики взаимодействия, такие как фотоны, принадлежат к другому классу, называемому бозонами. Они гораздо более общительны и не стесняются (а на самом деле даже предпочитают) обладать идентичными волновыми функциями и занимать одинаковые квантовые состояния. Принцип исключения к бозонам неприменим.

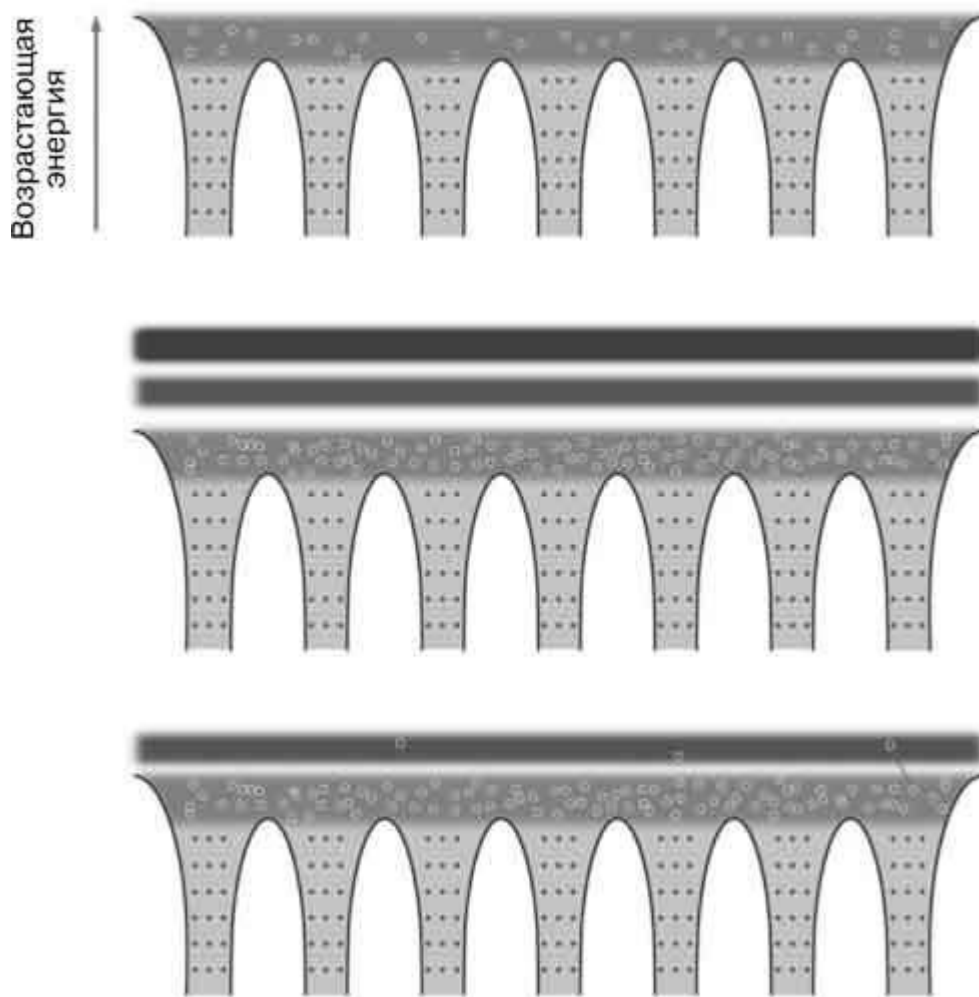
Таким образом, законы квантовой механики дали нам понимание строения атома. Внешние электроны атома определяют его химические свойства, которые, в свою очередь, объясняют, как атомы соединяются друг с другом для формирования различных материалов. Когда атомы оказываются вместе в веществе, их внешние электроны понимают, что обладают чуть большей свободой. Вместо того чтобы занимать определенный энергетический уровень, они принимают широкий диапазон энергий и составляют так называемую валентную зону. Так

как атомов очень много, позволенные в этой зоне значения энергии очень близки друг к другу, а потому ее можно считать практически непрерывным энергетическим спектром.

В некоторых материалах, например в металлах, эта валентная зона заполнена лишь частично, и принцип Паули не запрещает электронам двигаться по ней. Когда на металл подается ток, эти валентные электроны приходят в свободное движение, обеспечивая электрический ток. Валентная зона в таких материалах называется зоной проводимости, а сами материалы называются электрическими проводниками.

Если же материал состоит из атомов, валентная зона которых заполнена до отказа, то все состояния зоны заняты и перемещаться электронам некуда. Электроны валентной зоны более не могут свободно двигаться, поэтому такая зона не считается зоной проводимости.

Обычно между этой зоной и следующей существует промежуток. Если этот промежуток слишком широк, электроны просто остаются на месте, так как они не могут выскочить на свободу. А если они не могут пробиться в следующую энергетическую зону, они не могут и двигаться по материалу под воздействием электрического поля. Такие материалы называются диэлектриками.



Энергия электронов в твердых телах. Каждая заштрихованная шахта обозначает один атом в решетке. Многие электроны тесно связаны с атомами-хозяевами, занимают отдельные квантовые орбитали и, следовательно, не двигаются по решетке. Однако более высокие энергетические уровни, занятые внешними электронами, сливаются вместе и формируют «энергетические зоны», каждая из которых обладает непрерывным диапазоном позволенных энергий. Между этими зонами находятся энергетические промежутки, которые электронам

занимать запрещено. В металле-проводнике (вверху) верхняя (валентная) зона лишь частично заполнена электронами, которые, таким образом, свободны перемещаться по решетке, а следовательно, проводить электричество. В диэлектрике (посередине) валентная зона полностью заполнена и квантовые законы запрещают электронам двигаться. Так как промежуток между зонами слишком широк, чтобы его перепрыгнуть, электроны не могут пошевелиться. В полупроводнике (внизу) валентная зона также заполнена, однако промежуток между зонами очень узок и некоторые электроны могут перепрыгивать его, создавая новую проводящую зону.

Материалы, которые обладают промежуточной атомной структурой между проводниками и диэлектриками, характеризуются довольно интересным свойством. Атомы в решетке кремния, к примеру, обладают валентной зоной, полной электронов, однако энергетический промежуток между этой зоной и следующей вполне преодолим, поэтому некоторые наиболее высокоэнергетические электроны перепрыгивают в более высокую зону и превращают ее в зону проводимости. В связи с этим такие материалы называют «полупроводниками». Еще одна тонкость заключается в том, что, если электрон в полупроводнике вырывается из валентной зоны на свободу, на его месте остается дырка, которую может занять электрон соседнего атома. Это, в свою очередь, оставляет дырку во внешней зоне соседнего атома. Таким образом электрический ток, который толкает электроны в одном направлении, приводит к появлению положительной дырки^[63], которая движется в противоположном направлении, тем самым удваивая электрический эффект.

В чистом кремнии вышеописанный процесс происходит очень редко, так как возбужденный электрон быстро падает обратно, либо возвращаясь в свое изначальное положение, либо занимая дырку соседнего атома. При комнатной температуре проводящий электрон даст только один из десяти триллионов атомов кремния. Их количество можно увеличить путем подъема температуры, так как это предоставит дополнительную энергию для возбуждения большего числа электронов.

Однако есть и другой способ существенно повысить проводимость полупроводника – для этого необходимо добавить к нему крошечное количество другого элемента, называемое атомами примеси. Есть два типа примесей: атомы одних дают дополнительные электроны для повышения проводимости, а атомы других забирают электроны кремния для создания дырок, что также повышает проводимость. Получаемые таким образом два типа полупроводников называются электронными полупроводниками n-типа (где добавляется отрицательный заряд) и дырочными полупроводниками p-типа (где посредством кражи электронов увеличивается количество положительных дырок).

Это очень важно, поскольку, когда полоски полупроводников n-типа и p-типа кладутся друг на друга, они формируют электрический «выключатель», называемый p-n-переходом, который хитрым способом контролирует электрический ток. Такое устройство называется «диодом» и позволяет току течь в одном направлении гораздо проще, чем в противоположном. Основной принцип таков: когда два типа полупроводников вступают в контакт, некоторые свободные электроны полупроводников n-типа переходят в полупроводники p-типа и занимают имеющиеся дырки. Это приводит к появлению на границе тонкого слоя, отрицательно заряженного на стороне p-типа (так как число его положительных дырок сократилось) и положительно заряженного на стороне n-типа (так как сократилось число его электронов). Этот «обедненный» слой превращается в своеобразную улицу с односторонним движением, действуя подобно электрическому клапану: он позволяет току гораздо проще течь в одном направлении (от p-типа к n-типу), чем в противоположном.

Такие полупроводниковые диоды используются в целом ряде областей. Например, они могут испускать свет, когда ток проходит по переходу, и становятся тем самым светоизлучающими диодами, или просто светодиодами. Но пока самой известной сферой применения полупроводников остается производство «транзисторов».

Первые транзисторы были изобретены вскоре после Второй мировой войны тремя американцами – Джоном Бардином, Уолтером Браттейном и Уильямом Шокли, – которые работали в Лабораториях Белла. Их идея заключалась в использовании двух p-n-переходов, сложенных вплотную друг к другу. В зависимости от того, как именно они сложены, можно получить два типа так называемого биполярного транзистора, для которого будет характерна либо n-p-n – (p-тип между двумя n-типами), либо p-n-p-структура (n-тип между двумя p-типами). Мощный ток, текущий по пути большого сопротивления (то есть по сложному пути) через один из переходов, можно контролировать гораздо более слабым током, текущим по простому пути через другой переход. Слово «транзистор» происходит из комбинации двух слов, описывающих происходящие в этом устройстве процессы: трансфер-резистор.

Способные усиливать силу тока и напряжение, транзисторы отлично подошли для создания логических вентилях, то есть основных элементов компьютера. Они оперируют в соответствии с законами бинарной логики нулей и единиц, будучи либо «включенными», если по ним идет ток, либо «выключенными», если он не идет.

Транзисторы стали частью электрических схем, содержащих в себе и различные другие электрические компоненты, такие как резисторы и конденсаторы. В конце 1950-х годов было обнаружено, что такую схему можно создать из единственного блока полупроводникового материала, получив в итоге так называемую интегральную схему. Для этого использовались маленькие кусочки кремниевых пластин, называемые чипами (от англ. *chip* – тонкая пластинка), которые и дали этой схеме обиходное наименование.

Вскоре эти чипы стали производиться массово и быстро заменили громоздкие электронно-лучевые трубки, которые использовались в первом поколении компьютеров в 1940-х и 1950-х годах. К концу 1960-х каждый чип мог вмещать тысячи транзисторов в своей интегральной схеме. Сегодня в самых мощных микрочипах на площади размером с человеческий ноготь содержатся миллионы транзисторов. Более того, такие «микропроцессоры» не просто заточены под выполнение конкретной задачи, но могут быть запрограммированы на множество функций.

Хотя нам следует благодарить квантовую механику за технологию, стоящую за вездесущими микрочипами, распределение электронов в атомах, которое позволяет существование полупроводников, может и не казаться вам особенно странным квантовым явлением. Поэтому мне следует упомянуть еще одно устройство, которое также применяется в современных электронных схемах и эксплуатирует квантовую механику более очевидным образом. Туннельный диод использует тот факт, что электроны могут перепрыгивать изолирующий слой, проходить сквозь который они теоретически не имеют права. Но не пытайтесь представить их в виде крошечных частиц, которые перепрыгивают через стену в классическом смысле. Точнее будет сказать, что волновые функции электронов просачиваются за пределы изолирующей области. Благодаря такому квантовому скачку электроны получают способность преодолевать расстояния гораздо быстрее, чем при движении обычным путем через транзистор. В связи с этим такие устройства используются в качестве очень быстрых переключателей в микропроцессорах.

Отличная идея ищет применение

Именно так физики отнеслись к лазеру, когда он был изобретен в 1958 году. Сегодня лазер применяется во множестве сфер, от строительства кораблей до глазной хирургии, работы CD-

плееров и кассовых аппаратов. Но его действие не ограничивается испусканием мощного пучка света. Физика лазера представляет собой чистую квантовую механику. В отличие от микрочипа, который во многом основывается на свойствах электронов и их строгом подчинении принципу исключения, лазер полагается на товарищество и кооперацию фотонов.

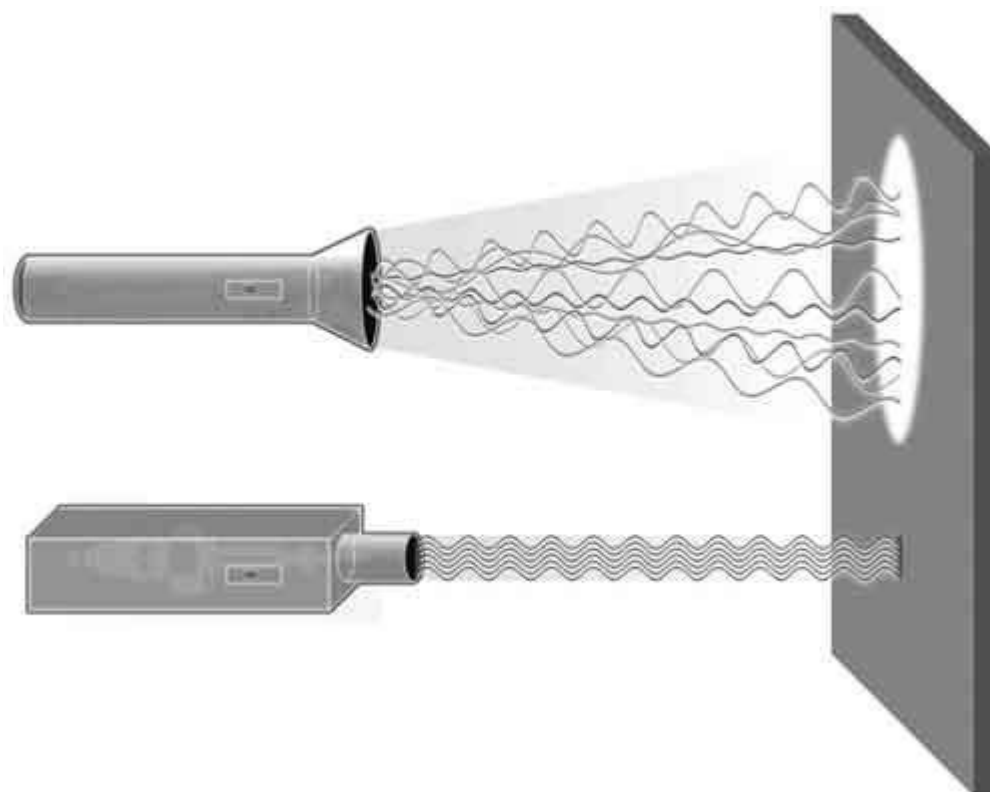
Когда электрон получает энергию, поглощая фотон, он получает возможность перепрыгнуть на более высокую атомную орбиту. Разница в энергии между двумя орбитами равняется энергии поглощенного фотона, которая, в свою очередь, зависит от его частоты согласно формуле Планка. Вскоре после этого «возбужденный» электрон спонтанно опускается обратно, испуская фотон той же самой энергии. Этот процесс называется спонтанным излучением и лежит в основе работы электрической лампочки. Идущий по вольфрамовой нити ток нагревает ее, заставляя электроны атомов вольфрама набирать энергию и в возбужденном состоянии перескакивать на более высокие орбиты. Снова падая обратно, они испускают фотоны широкого диапазона частот, включая и те, что находятся в видимом световом спектре.

Лазер работает иначе. Если не позволять электрону самому упасть на изначальный уровень, а стимулировать его к этому путем столкновения с входящим фотоном, на выходе мы получим два фотона – оригинальный и новый, испущенный электроном. Два этих фотона затем могут подталкивать к падению и другие возбужденные электроны, которые будут выпускать все новые и новые фотоны, что в некотором роде будет напоминать цепную реакцию. Этот процесс называется вынужденным излучением и дает название лазеру (акроним от англ. *light amplification by stimulated emission of radiation* – усиление света посредством вынужденного излучения).

Будучи бозонами, вылетающие фотоны пребывают в том же квантовом состоянии, что и налетающие фотоны. У них одинаковая длина волны, они находятся в одной фазе и движутся в одном направлении. В связи с этим свет лазера считается когерентным^[64]. Он может обладать очень высокой интенсивностью и фокусироваться в узкий пучок.

Первый лазер был создан в 1960 году, и с тех пор ему было найдено множество применений. Лазеры могут сваривать, резать и плавить. Их можно найти на автомобильных конвейерах и в текстильной промышленности. С их помощью можно проверять, ровно ли проложены каналы, и точно подгонять друг под друга крупные детали тяжелой промышленности. Их точные длины волн можно настроить и применять в областях вроде интерферометрии для сверхточного измерения длин. (К примеру, лазеры использовались для определения расстояния от Земли до Луны с точностью до нескольких сантиметров.) Они также используются для создания голограмм – трехмерных изображений с широким спектром применения, в том числе, возможно, даже в качестве невероятно эффективных устройств для хранения информации.

Лазеры также можно изготовить из полупроводниковых диодов способом, который напоминает производство светодиодов. Эти дешевые и сердитые твердотельные лазеры характеризуются стойкостью и надежностью, а по размерам сравнимы с песчинкой. Сегодня такие устройства используются в коммуникациях для передачи света по оптоволокну, а также в CD – и DVD-плеерах и кассовых аппаратах, где они сканируют штрихкоды.



В отличие от обычного света, излучаемого фонариком, который представляет собой путаницу электромагнитных волн множества различных длин, распространяющихся во всех направлениях, свет лазера очень упорядочен. Все волны имеют одинаковую длину, соответствующую характерной частоте испускающих их атомов. Свету лазера также свойственна высокая интенсивность из-за процесса амплификации. Кроме того, он не рассеивается после испускания, благодаря чему им можно светить на очень длинные расстояния.

Благодаря своей способности фокусировать энергетические фотоны с такой выдающейся точностью, лазеры также нашли широкое применение в компьютерной промышленности. Они используются в процессе, называемом фотолитографией, чтобы вытравливать бороздки интегральных микросхем на кремниевых чипах.

Лазерная фиброоптика скоро станет обычным способом передачи информации по миру – именно в ней и заключается будущее Интернета. Мы почти достигли того момента, когда наше интерактивное телевидение и компьютеры сольются воедино. Сейчас уже можно скачивать фильмы из Интернета и смотреть их на компьютере. Оптоволоконные кабели, передающие лазерный свет, скоро смогут менее чем за секунду переносить миллиарды бит информации, что эквивалентно объему всех произведений Уильяма Шекспира!^[65]

Возможно, примечательнее всего здесь то, что лазеры сегодня можно использовать для контроля отдельных атомов различными способами, открывающими совершенно новую сферу квантовой технологии, которая будет описана в последней главе.

Магниты размером с дом

Хотя я неплохо справляюсь с работой по дому, мои лабораторные навыки вечно подвергаются незлобным насмешкам со стороны коллег-экспериментаторов – они не упускают случая подшутить над нами, теоретиками. Хотя я и правда сумел избежать любой экспериментальной работы, до недавнего времени я не понимал, насколько я отстал от технологий, используемых для получения экспериментальных результатов, которые я затем

пытаюсь осмыслить. Однако суть истории, которую я собираюсь рассказать, не в этом – в ней описывается еще один способ применения квантовой физики, о котором вы, возможно, уже слышали.

В 1999 году я шесть недель провел в Циклотронной лаборатории Университета штата Мичиган, где работал над интерпретацией данных их последних экспериментов с «экзотическими» ядрами^[66]. Национальная сверхпроводящая циклотронная лаборатория Университета штата Мичиган считается одной из ведущих мировых исследовательских лабораторий в сфере ядерной физики, где создаются и изучаются редкие и экзотические виды ядер. Наличие циклотрона означает, что сильное магнитное поле ускоряет ядра до высоких энергий, после чего они намеренно разбиваются о ядерную мишень, чтобы проверить, что произойдет. В циклотронах используются мощные электромагниты, которые заставляют заряженные частицы, или ионы, двигаться внутри них, перемещаясь по спирали наружу и набирая скорость в процессе.

Я знал все это до своей поездки в Университет штата Мичиган и, конечно же, более или менее представлял, что происходит с заряженными ионами, когда они покидают циклотрон и входят в систему анализа пучка по пути к цели. На самом деле для целей моего исследования мне вполне достаточно было поверхностных знаний обо всем остальном. Мне не нужно было ни знакомиться с сырыми данными, ни понимать хитроумные техники их получения (а этих техник, поверьте, немало) – я работал лишь с итоговыми, полностью обработанными данными^[67].

Ускорительная установка находится в большом здании в центре кампуса, и по бокам от нее расположены офисные пространства. Во время своего пребывания в университете я входил в здание через одну из множества дверей и проходил в офис, где занимался разработкой математических моделей изучаемых ядерных реакций, писал компьютерный код или просто обсуждал физические проблемы с другими теоретиками. Конечно, в дополнение к этому я регулярно выходил за кофе, разговаривал в коридоре с коллегами-экспериментаторами и посещал семинары.

Однажды, ближе к концу моего пребывания в университете, я обсуждал кое-что со своим коллегой Греггерсом Хансеном у него в кабинете. Греггерс – один из ведущих ядерных физиков, он родился в Дании, но живет и работает в США. Он был одним из первооткрывателей нейтронного облака, которое я описал в Главе 3. Я заметил, как мерцает экран его монитора, и он объяснил, что ему пришлось «размагнитить» его, чтобы нейтрализовать лишние магнитные поля. Для удобства проведения этой процедуры на мониторе даже была специальная кнопка. Я спросил, зачем это необходимо, и он ответил, что всему виной проводящиеся на циклотроне испытания. Увидев, что это мне ни о чем не сказало, он пояснил, что проблема возникает из-за магнитного поля большего из двух сверхпроводящих магнитов, которые были включены в тот день. Когда я признался, что никогда его не видел, он не поверил своим ушам. «То есть ты шесть недель просидел в несчастных десяти метрах от самого мощного циклотронного магнита в мире^[68] и даже не заметил этого?» На следующий день – в последний день моей командировки – он провел мне экскурсию по лаборатории. Само собой, за стеной моего офиса и несколькими метрами сдерживающего радиацию экрана, находился гигантский магнит – он был таким огромным, что нам пришлось подняться по проложенной вокруг него лестнице, чтобы попасть на вершину. После этого мне повезло провести некоторое время в лаборатории TRIUMF в Ванкувере, где находится крупнейший в мире циклотронный магнит, по мощности, однако, уступающий магниту Университета штата Мичиган.

Интересно, как именно работают такие магниты, поскольку они находят применение другому чисто квантовому эффекту – сверхпроводимости.

Непрерывное электричество

Причина, по которой все проводники демонстрируют электрическое сопротивление, заключается в том, что проводящие электроны постоянно натыкаются на вибрирующие атомы металла. Эти вибрации усиливаются при нагревании металла, тем самым увеличивая сопротивление. Конечно же, охлаждая металл, мы понижаем атомные вибрации, а следовательно, и сопротивление. Но в 1911 году был открыт очень неожиданный эффект.

При охлаждении ртути до температуры ниже 4,2 Кельвина^[69] ее электрическое сопротивление вдруг падает до нуля, и она становится сверхпроводником. Теперь мы знаем, что это характерно для многих металлов и металлических сплавов при охлаждении ниже их критической температуры, которая обычно бывает на несколько градусов выше абсолютного нуля. Это означает, что идущий сквозь сверхпроводник ток никогда не уменьшается и не требует постоянного источника напряжения. Хотя мы не можем утверждать наверняка, что сопротивление сверхпроводника равняется именно нулю, оно настолько близко к нулю, что уже не представляет проблемы.

Истоки этого эффекта лежат в квантовой механике. В 1957 году трое ученых – Джон Бардин, уже становившийся лауреатом Нобелевской премии за свой вклад в изобретение транзистора, Леон Купер и Роберт Шриффер – объяснили механизм его работы и получили Нобелевскую премию за это открытие. При определенной температуре электроны со сходными волновыми функциями стремятся к объединению в названные в честь одного из их первооткрывателей «куперовские пары», что объясняется очень слабой силой притяжения. Чтобы понять это, нужно посмотреть, как присутствие каждого электрона влияет на окружающую среду. (Не буду перегружать вас техническими деталями.)

Каждая куперовская пара затем начинает вести себя как единичный бозон (два фермиона вместе всегда составляют бозон)^[70]. Само собой, вам простительно думать, что электроны в этих куперовских парах движутся исключительно вместе, как сиамские близнецы. В конце концов, если они формируют бозон, он явно должен представлять собой нечто вроде новой «частицы». Однако не стоит забывать уроки квантовой физики. Двум электронам необязательно находиться в непосредственной близости друг к другу. В действительности расстояние между членами такой пары в тысячу раз больше среднего расстояния между двумя любыми отдельными электронами в материале! Мы считаем куперовскую пару запутанным состоянием, описываемым одной волновой функцией. Ее поведение в качестве единого бозона объясняется нелокальной связью электронов. Два электрона куперовской пары находятся в постоянном взаимодействии, как подростки, которые стоят в разных концах школьной площадки и болтают друг с другом по мобильным телефонам, что не является квантовым эффектом, но точно весьма странно!

Наконец, электрического сопротивления нет, поскольку для его наличия одному из двух электронов нужно столкнуться с атомом и отскочить от него с достаточной силой, чтобы разбить пару. Следовательно, такое рассеяние должно быть весьма сильным. При очень низких температурах связь куперовских пар достаточно сильна, чтобы выдержать слабое атомное рассеяние, поэтому электроны пары просто не сталкиваются с атомами и электрического сопротивления не возникает.

Одним из многих применений сверхпроводимости, как в случае с циклотроном Университета штата Мичиган, является создание мощных магнитов. (Моя история, таким образом, представляет собой пример того, как квантовую странность применили для разработки аппарата для изучения еще большей квантовой странности, обнаруживаемой в экзотических атомных ядрах!) Обычный электромагнит предполагает прохождение тока по катушке, которая генерирует магнитное поле. Чем больше у катушки витков, тем мощнее поле. Однако

тем сильнее и сопротивление, которое ослабляет ток, из-за чего для компенсации требуется более высокий вольтаж. Эта проблема исчезает при использовании катушки из сверхпроводящего материала. На практике большие классические электромагниты имеют железный сердечник, заключенный в электрическую катушку, поскольку без него количество необходимого тока делает такой магнит безнадежно дорогим. Однако с железным сердечником мощность магнитного поля достигает максимума, и единственным способом получить большую мощность остается создание большего магнита (с большим количеством железа). Чтобы такой магнит справлялся с задачей сверхпроводящего магнита Университета штата Мичиган, он должен быть размером со средний многоквартирный дом!

Сегодня сверхпроводящим магнитам нашлось множество применений. К примеру, они используются в качестве магнитных разделителей в добывающей промышленности и в качестве магнитных навигационных систем в медицине, где они позволяют хирургам проводить катетеры сквозь тело, вводить препараты и осуществлять биопсию.

Подобно тому как фотоны в лазере действуют в гармонии друг с другом, чтобы усилить квантовый эффект до макроскопических уровней, куперовские пары в сверхпроводниках тоже могут работать вместе как группа бозонов. Это немного напоминает большие косяки рыб, которые движутся, как единая сущность, – их часто показывают по телевидению в программах о живой природе. Такое поведение среди прочего нашло применение в устройстве под названием СКВИД (акроним от англ. *Superconducting Quantum Interference Device* – сверхпроводящий квантовый интерферометр). В СКВИДах используются компоненты, называемые джозефсоновскими контактами, которые немного напоминают туннельные диоды. Но вместо двух полупроводниковых полосок джозефсоновский контакт состоит из двух сверхпроводников, разделенных тонким изолирующим слоем. Куперовские пары могут с легкостью проходить сквозь этот слой, благодаря чему СКВИД становится невероятно чувствительным к мельчайшим изменениям магнитных полей. Это устройство используется в том числе в медицине, где при помощи него изучается активность мозга, для чего ведется наблюдение за магнитными полями, создаваемыми мельчайшими электрическими токами, соответствующими отдельным нейронам.

Наконец, одной из самых оживленных областей физических исследований в последние пятнадцать лет была сфера высокотемпературной сверхпроводимости. Иметь сверхпроводящий материал очень выгодно, однако его температуру нужно поддерживать на таком низком уровне, зачастую с использованием жидкого гелия^[71], что для практического применения он часто становится неудобен. В 1986 году был обнаружен определенный тип керамики, который обладает сверхпроводящими свойствами при температурах до 100 К. (Это все еще на 173° градуса ниже температуры замерзания воды!) Текущие исследования в этой области затрагивают три проблемы: существуют ли материалы, характеризующиеся сверхпроводимостью при комнатной температуре, являются ли эти материалы ковкими металлами, так как керамика слишком хрупкая, чтобы ее можно было растянуть в проводящие электричество провода, и, наконец, что именно заставляет эти материалы вести себя таким образом при таких (относительно) высоких температурах.

Если нам когда-либо удастся сделать электрические провода из сверхпроводящего при комнатной температуре материала, цена электричества резко упадет. В настоящее время электричество характеризуется достаточно низкой энергоэффективностью, что отчасти объясняется энергетическими потерями в форме тепла, отдаваемого при сопротивлении кабелями передачи, которые опутывают землю. Используя сверхпроводящие кабели, мы могли бы с гораздо большей эффективностью передавать в пять раз большее напряжение, а следовательно, могли бы позволить существенно сократить потребление ископаемых источников топлива.

Энергия из ядер

Раз уж я затронул тему энергоресурсов, теперь самое время описать еще одно применение квантовой механики. Ядерная энергетика в настоящее время производит одну шестую мирового электричества (а во Франции этот показатель составляет почти две трети). В основе ядерной энергетики лежит идея о реакции распада, в ходе которой тяжелые ядра поглощают нейтроны, в результате чего распадаются надвое и высвобождают энергию. В процессе они производят новые нейтроны, которые поглощаются соседними ядрами, после чего те тоже распадаются, поддерживая цепную реакцию. Получаемое в результате этих реакций тепло используется для превращения воды в пар, который толкает турбины, вырабатывающие электричество.

Более чистым способом извлечения энергии, заключенной в ядре атома, является обратный процесс. В реакции синтеза два легких ядра сталкиваются и образуют более крупное и более стабильное ядро. Это достигается посредством высвобождения огромного количества энергии, которую можно использовать. Эта энергия «термоядерного синтеза» служит источником тепла и света от Солнца и представляет собой причину сияния звезд.

Начинающаяся с двух ядер водорода (отдельных протонов) последовательность шагов приводит к формированию ядра гелия (два протона и два нейтрона – альфа-частица). Проблема заключается в том, что два протона отталкиваются, если их не столкнуть – то есть если не обеспечить квантовое туннелирование сквозь энергетический барьер между ними. Для этого нам необходимо создать крайне экстремальные условия высокой температуры и плотности – внутри Солнца проблем с этим не возникает, но в лаборатории на Земле поддерживать их очень сложно.

Интересно отметить, что первый шаг в процессе синтеза внутри Солнца предполагает совместное участие всех четырех сил природы. Гравитационная сила притяжения между всей материей обеспечивает достаточно плотное расположение водорода для увеличения шансов на синтез двух протонов, в то время как притягивающее сильное взаимодействие побеждает отталкивающую электромагнитную силу и сводит их еще ближе. Но так как два протона не могут навсегда связаться друг с другом, а протон и нейтрон – могут, одному из протонов приходится подвергнуться бета-распаду и превратиться в нейтрон, для чего в дело и вступает слабое взаимодействие. Как только это произошло, мы получаем связанные протон и нейтрон.

Ядро, состоящее только из протона и нейтрона, называется дейтроном и представляет собой ядро тяжелого изотопа водорода – дейтерия. Дейтрон сыграл важную роль в развитии ядерной физики. Это простейшее составное ядро – меньше него лишь одиночный протон или нейтрон, – а потому оно служит опытным образцом для изучения свойств ядерной силы, которая удерживает нуклоны вместе внутри ядра. С помощью него также можно изучать взаимодействие с другими ядрами, чтобы исследовать их свойства. При подготовке докторской мне повезло иметь своим научным руководителем Рона Джонсона, одного из ведущих мировых экспертов по строению и реакционным характеристикам дейтрона, из-за чего в студенческой среде за ним закрепилось прозвище Дейтрон Джонсон.

Как только дейтроны формируются внутри Солнца, они могут вступать в реакцию синтеза с другими протонами и образовывать ядра гелия. Для этого дейтронам и протонам необходимо туннелировать сквозь их обоюдный кулоновский барьер.

Исследование синтеза с участием дейтерия и трития (еще более тяжелого изотопа водорода, ядра которого состоят из одного протона и двух нейтронов) проводятся во многих странах. В настоящее время «порог самоокупаемости» уже пройден, то есть в результате процесса синтеза производится больше энергии, чем необходимо для создания начальных условий,

требуемых для синтеза ядер. Следующим шагом станет поддержание условий синтеза в течение более чем краткой доли секунды!

Реакторы синтеза не только обладают бесконечным запасом топлива (воды), но и производят гораздо менее опасные отходы, чем реакторы ядерного распада. Именно поэтому большинство самых богатых стран инвестировало и продолжает инвестировать огромные средства в эти исследования, несмотря на медленный прогресс.

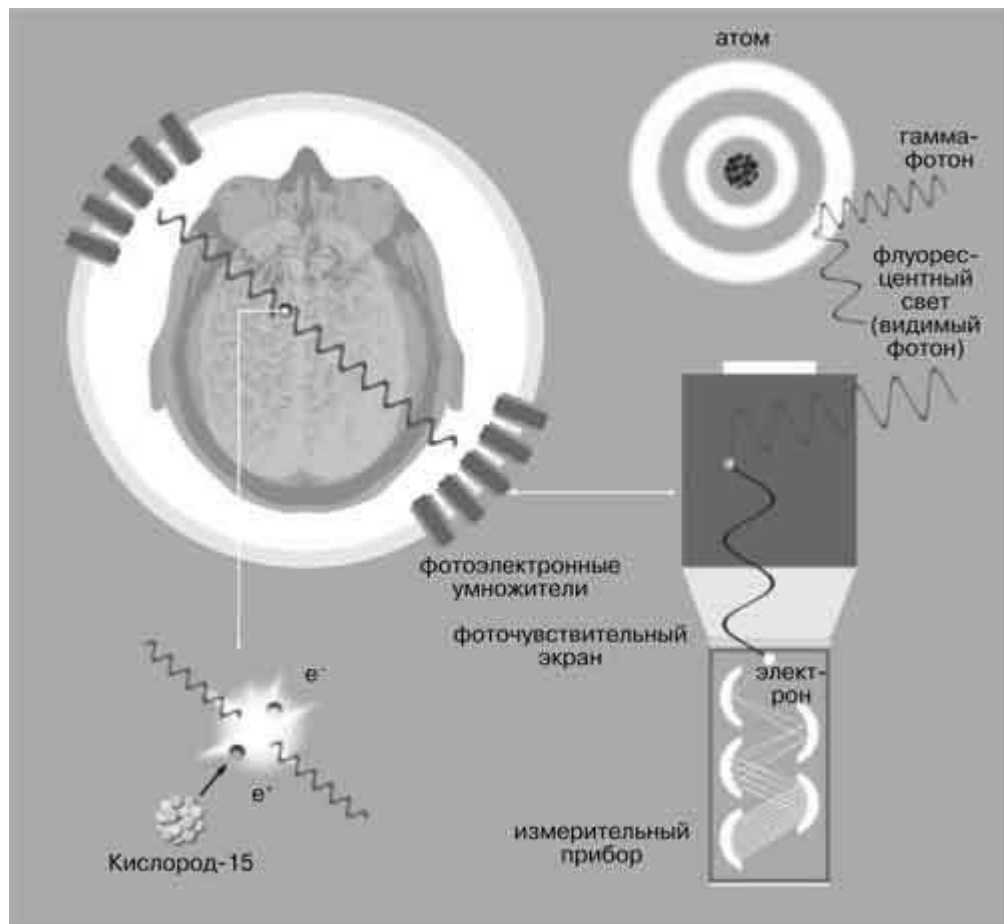
Квантовая механика в медицине

Мне не перечислить всех применений квантовой механики в медицине, от рентгеновских лучей до лазерной хирургии, поэтому я кратко опишу лишь два. Одно использует квантово-механический спин ядер, в то время как другое предполагает применение антивещества для создания карты мозга.

Принципы техники ядерного магнитного резонанса (ЯМР) полвека назад были разработаны американскими физиками и уже многие годы использовались для проведения спектроскопии в химии. Идея заключается в измерении концентрации различных атомов в материалах на основании излучения их ядер при перенаправлении их квантового спина в магнитном поле. Многие ядра вращаются (квантомеханически) из-за совокупного спина составляющих их протонов и нейтронов. Ось вращения ядра, как стрелка компаса, становится параллельно линиям воздействующего на нее внешнего магнитного поля. В зависимости от направления спина (в свободном классическом смысле) мы можем посчитать эту ось указывающей в одну или в другую сторону вдоль линий магнитного поля. Это направление спина называется просто: «спин вверх» или «спин вниз». Некоторые ядра затем индуцируются для разворота спина под действием высокочастотного сигнала колеблющегося магнитного поля. Возвращаясь к начальной ориентации, они высвобождают крошечное количество энергии, специфичной для этого типа ядра.

Большая часть материалов, таких как органическое вещество, из которого сформированы наши тела, состоит из молекул, которые, в свою очередь, состоят из различных видов атомов. Применяя технику, называемую «построением проекций», ЯМР-сигналы от постоянных разворотов спина определенных атомов можно использовать для создания изображений внутреннего строения человеческого тела. Этот метод практически не причиняет человеку вреда, поскольку, в отличие от рентгеновской томографии, в этом случае тело не подвергается воздействию вредного ионизирующего излучения. Несмотря на это аппараты, применяющие описанную технику, обычно называют магнитно-резонансными томографами (МРТ), поскольку использующееся в ЯМР слово «ядерный» вызывает у многих страх.

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) представляет собой удивительную технику, принцип действия которой объяснить довольно просто. В частности, ПЭТ применяется для получения изображения мозга жертвы инсульта или новорожденного младенца, подвергшегося при рождении кислородной недостаточности. Сначала в тело вводится глюкоза, содержащая безвредные радиоактивные изотопы углерода или азота, которые переносятся в мозг. Затем путем измерения концентрации глюкозы, источника энергии для мозга, в различных областях выделяются области высокой и низкой нервной активности.



Как работает ПЭТ-сканер. Атомы нестабильного изотопа используются, чтобы направить молекулы глюкозы в мозг. Ядра этих атомов подвергаются бета-распаду путем испускания позитрона (античастицы электрона). Этот позитрон быстро сталкивается с атомным электроном и аннигилирует, высвобождая два идущих друг за другом гамма-фотона. ПЭТ-сканер состоит из массивов фотонных детекторов, которые регистрируют гамма-лучи сцинтиллирующими кристаллами. Многие атомы в этих кристаллах возбуждаются единственным высокоэнергетическим гамма-лучом, но быстро падают на начальный уровень, высвобождая менее энергетические фотоны. Эти фотоны, в свою очередь, запускают высвобождение каскада электронов внутри трубки фотоэлектронного умножителя, в результате чего на выходе мы видим электрическую пульсацию. Эти сигналы используются, чтобы срез за срезом построить карту мозга на основании концентрации глюкозы в различных его областях. Хотя возможность заглянуть внутрь человеческого мозга при помощи радиоактивных атомов, которые выплевывают антивещество, и может показаться пугающей, на самом деле ПЭТ-сканеры причиняют меньше вреда, чем рентгеновские лучи.

Радиоактивные изотопы в глюкозе подвергаются бета-распаду и испускают позитроны. Эти частицы почти сразу встречаются с электронами и происходит процесс аннигиляции пар, в ходе которого электрон и позитрон исчезают во вспышке света, испуская два энергетических фотона. Эти фотоны регистрируются детекторами, называемыми фотоэлектронными умножителями, и их пути прослеживаются до той самой точки внутри мозга, где произошла аннигиляция электрона и позитрона. Таким образом обнаруживается распавшееся радиоактивное ядро, а следовательно, и перенесшая его глюкоза. В результате регистрации большого количества таких фотонных пар за определенный отрезок времени создается серия изображений, которая показывает изменения в концентрации глюкозы.

Квантовая механика и генетические мутации

Несколько лет назад мы с моим коллегой-микробиологом Джондžo Мак-Фадденом опубликовали в американском журнале *Biosystems* спекулятивную статью, в которой предположили квантовое происхождение необычного типа генетической мутации, известной как адаптивная мутация, бактерии *E. coli*. Спекулятивной эта статья была по двум причинам. Во-первых, процесс адаптивных мутаций был и в некотором роде остается объектом противоречий. Во-вторых, предлагаемый нами квантовый механизм требовал наличия у живых клеток определенного уникального квантового свойства, иначе вся наша теория не выдерживала бы никакой критики.

Теперь мы знаем, что свойства генетического кодирования молекул ДНК во всех живых клетках объясняются природой водородных связей между базовыми парами. Как только Френсис Крик и Джеймс Уотсон открыли двойную спираль ДНК, стало известно, что определенные естественные мутации могут происходить из-за произвольного квантового туннелирования протонов с одного места ДНК в другое, что приводит к формированию другой химической связи. Эта своего рода случайная ошибка в коде ДНК случается в одном случае на миллиард, но, когда это происходит, мы получаем квантовую мутацию. Таким образом, квантовая механика явно сыграла некоторую роль в процессе эволюции.

Адаптивные мутации невозможно объяснить столь же очевидным образом. Когда штамму клеток *E. coli*, называемому *lac*⁻, поскольку он лишен энзима, позволяющего ему питаться лактозой, дают одну лактозу, ожидается, что большинство клеток погибнет от голода. Однако немногие случайным образом мутируют в штамм *lac*⁺, который может питаться лактозой и расти, а следовательно, начинает делиться. Было обнаружено, что в присутствии лактозы в *lac*⁺ *E. coli* мутирует гораздо больше *lac*⁻, чем в ее отсутствие, даже несмотря на то что они не могут знать о присутствии лактозы, пока не произойдет мутация. Это казалось настоящим волшебством.

Объяснение здесь может дать идея квантовой суперпозиции. Видите ли, в каждой клетке мутация *lac* – в *lac*⁺ может объясняться туннелированием одного протона между двумя соседними положениями. С точки зрения квантовой механики, конечно, волновая функция протона такова, что есть определенная вероятность его обнаружения в любом из этих положений, то есть она пребывает в суперпозиции осуществленного и неосуществленного туннелирования. При условии что такая квантовая когерентность может достаточно долго поддерживаться в клетке, вся ДНК должна превратиться в суперпозицию мутировавших и не мутировавших состояний.

Проблема, само собой, заключается в декогеренции, в просачивании квантовой странности в окружающую среду. Это должно занимать не более одной миллионной доли секунды, то есть слишком быстро, чтобы в клетке произошли необходимые изменения и она (или часть ее волновой функции) мутировала в тот штамм, который знает о присутствии лактозы и может ее перерабатывать. Однако мы хотели, чтобы суперпозиция сохранялась достаточно долго, чтобы декогеренцию вызывала сама лактоза. В таком случае лактоза фактически открывает коробку с котом Шрёдингера и приводит к коллапсу волновой функции клетки, которая начинает описывать лишь одно состояние из двух возможных. Это происходит потому, что при наличии верного штамма *E. coli* запускаются химические реакции с участием лактозы, которые также могут вызывать декогеренцию. Если декогеренция в присутствии лактозы проявляется быстрее, чем в ее отсутствие, мы можем объяснить неожиданные результаты, полученные в экспериментах по адаптивной мутации.

Причина этого в таком случае кроется в простом механизме, где повторяющиеся измерения «тянут» квантовую систему из одного состояния в другое. Если лактоза «измеряет» клетку и выясняет, что она пребывает в мутировавшем состоянии *lac*⁺, что происходит редко, то

клетка начинает питаться этой лактозой и расти. Но если клетка пребывает в состоянии *lac*-, то ничего не происходит, и она снова возвращается в суперпозицию двух состояний. Следовательно, чем чаще будет проводиться измерение, тем более регулярным станет появление мутаций *lac*+

К несчастью, поверить, что квантовая когерентность будет так долго сохраняться в столь сложной и активной среде, как живая клетка, весьма нелегко. Это возможно, только если клетка ведет себя совершенно иначе, чем неодушевленная система эквивалентного размера, сложности и температуры. И правда, в 1944 году в своей знаменитой книге «Что такое жизнь?» Эрвин Шрёдингер предположил, что живые клетки поддерживают структуру и порядок, эквивалентный порядку обычной материи при температуре, стремящейся к абсолютному нулю – в режиме, где квантовые эффекты сохраняются гораздо дольше. Но, поскольку никто до конца не понимает, что именно делает жизнь такой особенной, наша теория остается спекуляцией.

За прошедшее с момента публикации статьи время я несколько охладел к этой идее. Однако физик Пол Дэвис – один из немногих, кто воспринял наше предположение на ура, – тоже интересуется этими вопросами. Он утверждает, что нам еще предстоит должным образом понять природу декогеренции, не говоря уже о сложных квантовых свойствах живых клеток, поэтому нам еще работать и работать в этом направлении.

Микроскопы для наблюдения за атомами

К началу 1930-х годов развитие оптических микроскопов – таких микроскопов, которые направляют свет на образец посредством системы линз, – достигло потолка. Длина волны видимого света ограничила максимальное приближение примерно до 1000× (а разрешающую способность – до долей микрона). Желание рассмотреть в живых клетках более мелкие детали привело ученых к мысли об использовании гораздо более коротких волн. Здесь и оказалась полезной квантовая волновая природа электронов. Длины волн материи, соответствующих пучкам электронов, существенно меньше длин волн видимого света. Первый электронный микроскоп был разработан в Германии в 1931 году и использовался для направления пучка электронов для исследования строения и состава образцов. Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) работает по тому же принципу, что и диапроектор, где часть пучка проходит сквозь образец, в результате чего его изображение проецируется на экран.

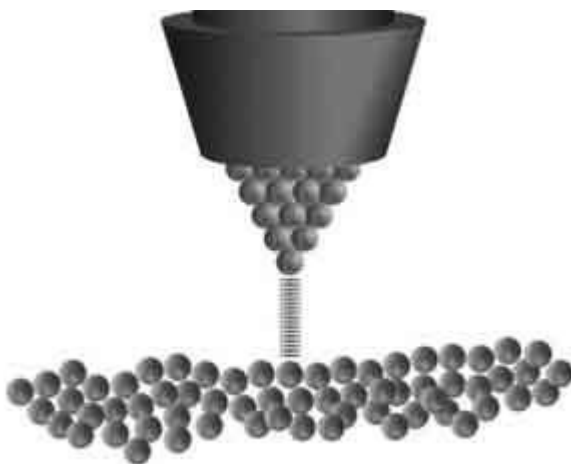
После Второй мировой войны появился новый тип электронного микроскопа, так называемый растровый электронный микроскоп (РЭМ). Он сканирует поверхность образца электронным пучком. Изображение поверхности формируется путем сбора и усиления электронов, которые отскакивают от образца или выбиваются из него.

Успехи в области микроскопии привели к тому, что сегодня разрешение позволяет разглядеть отдельные атомы. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), впервые разработанный в начале 1980-х, предполагает скольжение острой проводящей металлической иглы над поверхностью образца. Электроны получают возможность осуществлять квантовое туннелирование сквозь промежуток на поверхность образца, а вырабатываемый таким образом измеряемый электрический ток соответствует ширине промежутка, а следовательно, и положению атомов на поверхности образца.

Принципиальным недостатком СТМ является то, что образец тоже должен быть очень хорошим электрическим проводником, причем изучаемые пробы необходимо подготавливать определенным образом. К 1989 году был разработан первый поступивший в продажу атомно-силовой микроскоп (АСМ). Хотя такие микроскопы используют сходную технику сканирования с применением острой иглы для зондирования и описания поверхности образца, они не регистрируют туннелирование электронов, а задействуют очень

чувствительную пружину, которая чуть прижимает иглу к поверхности образца. Используемая для удержания иглы на месте при ее скольжении по неровной поверхности сила сравнима с внутриатомными силами (и составляет примерно 10^{-9} Ньютона), поэтому микроскоп и называется атомно-силовым.

В наши дни сканирующая микроскопия с использованием СТМ и АСМ применяется не только для получения изображений поверхностей образцов. Физики и химики в состоянии использовать зонд для контролируемого перемещения молекул и даже отдельных атомов. В настоящее время разрабатываются новые техники, которые применяются в целом спектре сфер, от биологии до полупроводников, от хранения данных до изучения атомной структуры полимеров и кристаллов. В будущем зонды СТМ, возможно, будут использоваться даже для построения целых массивов крошечных молекулярных машин, Священного Грааля процветающей сферы нанотехнологий.



Зонд СТМ сканирует поверхность материала, позволяя электронам туннелировать сквозь промежуток и генерировать электрический ток, который дает описание контуров поверхности. Такой зонд можно использовать даже для контролируемого перемещения атомов по поверхности.

Атомная инженерия и нанотехнологии

Из названия понятно, что нанотехнологии представляют собой относительно новую сферу строительства и применения микромеханизмов в масштабах нанометров (10^{-9} метров, или миллионных долей миллиметра). Это масштаб атомов и молекул, который совершенно точно принадлежит к квантовому миру. Многие физики сегодня полагают, что ничто не запрещает однажды действительно создать таких крошечных молекулярных роботов, состоящих из микросхем, рычагов, шестеренок и передач. Чтобы вы могли представить себе размеры этих существей, я скажу, что они в сравнении с муравьем будут примерно такими же, как сам муравей в сравнении с футбольным стадионом. Ученые уже продемонстрировали свою способность контролируемо манипулировать отдельными атомами и молекулами, и многие полагают, что создание дизайнерских нанороботов уже не за горами. Предсказывают, что нанотехнологии могут запустить промышленную революцию, которая изменит нашу жизнь даже более существенным образом, чем в прошлом веке это сделала микроэлектроника.

Вполне возможно, что в будущем эти молекулярные роботы смогут триллионами воспроизводить самих себя из сырья, доступного в окружающей их среде. Таким образом целые армии подобных машин можно будет использовать для выполнения безумного набора

задач, от убийства раковых клеток (по одной!) до создания настоящих чудес инженерии и даже производства так называемых «умных материалов».

Хотя до распространения этих технологий остаются еще целые десятилетия, первые шаги в этом направлении уже сделаны. В начале 1990-х годов японские исследователи изучали копоть (полученную при электрическом разряде между двумя углеродными электродами) под просвечивающим электронным микроскопом. Они обнаружили крошечные молекулярные углеродные трубки, которые, как оказалось впоследствии, обладают удивительными свойствами. Эти углеродные нанотрубки представляют собой не что иное, как скрученные отдельные пластинки графита (известные под названием графен) толщиной в один атом. Благодаря свойствам углеродных связей, эти нанотрубки могут использоваться в качестве совершенного высокопрочного волокна, из которого можно в том числе изготавливать наконечники для сканирующих зондовых микроскопов и строить сейсмоустойчивые дома. Сделанные из углеродных нанотрубок автомобили после столкновений будут возвращаться в свою изначальную форму.

Нанотрубки также могут служить молекулярными проводами, которые можно приспособить для использования либо в качестве фантастических электропроводников (по эффективности сравнимых со сверхпроводниками), либо в качестве полупроводников в интегральных схемах. Их можно применять даже для эффективного перемещения атомов и молекул.

Следите за новостями.

Конденсаты Бозе – Эйнштейна

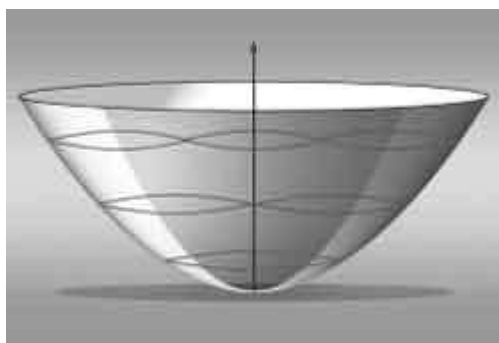
Эд Хиндс, профессор физики, Университет Сассекса

Представьте один атом, запертый в чрезвычайно маленькой чаше.

Квантовомеханическая волновая функция описывает поведение атома в ловушке.

Волновая функция с разной амплитудой вибрирует в разных местах чаши, и квадрат амплитуды вибрации определяет вероятность обнаружения атома в конкретном месте.

Если предположить, что атом не может внедриться в стенку чаши, то волновая функция там будет равняться нулю.



На рисунке выше показаны три самых простых возможных волновых функции с 1, 2 и 3 зонами максимальной вибрации. Чем меньше расстояние между нулями волновой функции, тем выше энергия атома, так что три этих волновых вероятности соответствуют трем низшим энергиям атома в чаше. Различные энергетические состояния обозначаются индексом $n = 1, 2, 3$ и т. д., называемым квантовым числом. Если в чаше содержится облако атомов, любой из них движется, пребывая в суперпозиции многих различных квантовых состояний. Чем выше температура, тем больше диапазон возможных квантовых состояний. Основное состояние при нормальных условиях занимает редко, поскольку существует слишком много альтернатив.

Но если газ становится достаточно холодным, а плотность атомов – достаточно высокой, может случиться, что основное состояние займут сразу два атома. Если они принадлежат к верному типу атомов (и являются бозонами), результат оказывается довольно примечателен. Волновые функции, описывающие два этих атома, складываются в одну, амплитуда вибрации которой удваивается, а вероятность обнаружения атома в этом месте увеличивается в четыре раза – иными словами, большее количество атомов притягивается в это состояние. Чем больше атомов занимают основное состояние, тем сильнее возрастает амплитуда волновой функции и тем притягательнее это состояние становится для остальных атомов, движущихся в газе. Этот эффект интерференции объясняется конструктивным сложением волн, описывающих каждый атом. В результате возникает лавина, в ходе которой почти все атомы соглашаются занять низшее энергетическое состояние, в то время как остальная энергия в газе распределяется между малым числом оставшихся атомов. Часто они становятся такими высокоэнергетическими, что вылетают из чаши, оставляя едва ли не все атомы в основном состоянии. Этот процесс называется конденсацией Бозе – Эйнштейна, а набор атомов в одном квантовом состоянии носит название конденсата Бозе – Эйнштейна, или бозе-конденсата^[72].

Бозе-конденсат обладает интересными свойствами, которые объясняются тем фактом, что все частицы ведут себя одинаково. В жидком гелии около 10 процентов атомов формируют бозе-конденсат, но эта часть жидкости течет без какой-либо вязкости, что делает ее сверхтекучей. Свет лазера представляет собой бозе-конденсат фотонов (фотоны являются бозонами), а это означает, что фотоны в лазерном пучке ведут себя одинаково – этим объясняется и чистый цвет, и прицельность пучка. Конденсация Бозе – Эйнштейна атомного пара впервые была обнаружена в 1995 году в облаках рубидия Эриком Корнеллом и Карлом Уйманом в исследовательском институте JILA и в облаках натрия Вольфгангом Кеттерле в Массачусетском технологическом институте. Подобно лазерному пучку, высвобождаемые из бозе-конденсата атомного пара атомы могут формировать пучок с невероятно точно определенной энергией, направлением и колебательной фазой. Такой пучок называется атомным лазером.

Квантовая механика и биология

Джонджо Мак-Фадден, профессор микробиологии, Университет Суррея

Прошло более 50 лет, с тех пор как Эрвин Шрёдингер сделал поразительное предположение, что жизнь покоится на квантово-механических принципах. И все же большинство его аргументов справедливо и сегодня. Шрёдингер заметил, что все классические законы имеют статистический характер и верны для наборов из миллиардов атомов или молекул, но неприменимы на уровне отдельных частиц. Жизнь, утверждал он, основана на динамике отдельных частиц, а следовательно, подчиняется квантовым законам.

Для 1944 года, когда считалось, что внутри клетки находится аморфная субстанция, именуемая протоплазмой, его предсказание было весьма примечательным. Но когда молекулярные биологи лучше изучили работу клеток, они увидели их строение на всех уровнях. Ширина двойной спирали ДНК составляет всего два нанометра (две миллионных доли миллиметра) – это не слишком выбивается из атомных масштабов, – и вместе с белками и другими клеточными составляющими спираль ДНК имеет структуру размером менее одной десятой этой величины. Динамика внутри этих биомолекул представляет собой исключительно движение отдельных частиц. Представьте ферментную ротационную машину F1-АТФазу, которая производит АТФ (химическое топливо для клеток). Ширина этого крошечного биологического устройства составляет всего десять нанометров. Фермент находится на клеточной мембране, где его ротация поддерживается потоком протонов,

идушим через центральную пору. Но как ротационное движение в таком масштабе преобразуется в химическую энергию – по-прежнему загадка. Здесь явно не обходится без квантовой механики.

Считается, что в огромное количество биохимических процессов, включая фотосинтез, дыхание, мутацию и сворачивание белка, вовлечено квантовое туннелирование. К примеру, ученые полагают, что ферменты, которые формируют протонный градиент, подталкивающий F1-АТФазу, используют электронное туннелирование, чтобы связать процесс переноса протонов с белками дыхательной цепи. Действительно, многие полагают, что и электронное, и протонное туннелирование представляют собой недостающие ингредиенты, которые объясняют, каким образом ферменты могут массово ускорять химические реакции. Квантовое туннелирование также может участвовать в сворачивании белка – процессе, в ходе которого молекула белка просматривает миллиарды возможных структур, чтобы найти свою активную форму. Кроме того, квантовое туннелирование может быть фундаментальным для эволюционного развития жизни на Земле. Уотсон и Крик первыми предположили, что таутомерия – химический эвфемизм протонного туннелирования – ДНК-базы внутри двойной спирали отвечает за мутации. Мы с Джимом Аль-Халили внимательнее изучили этот механизм и предположили, что в некоторых типах мутации также может быть задействована квантовая когерентность.

Живая клетка – это нанотехнология природы. Подобно тому как работающие в наномасштабе инженеры и физики должны использовать в своих моделях квантовую механику, продолжающаяся более трех миллиардов лет эволюция точно включила в себя квантовую динамику. Скорее всего, квантовая механика столь же фундаментальна для жизни, как и вода. Недавние эксперименты и симуляции действительно показали, что участвующие в водородных связях в воде протоны в высокой степени делокализованы (то есть находятся в суперпозиции пребывания в двух разных местах). Образование водородных связей, возможно, представляет собой самое фундаментальное биохимическое взаимодействие, участвующее в процессе образования базовых ДНК-пар, ферментном катализе, сворачивании белка, дыхании и фотосинтезе. Если в основе этого феномена лежит квантовая делокализация, значит, она критически важна для жизни. И правда, несколько исследователей (включая меня и Пола Дэвиса) предположили, что в квантовой механике, возможно, таится решение главной биологической загадки – вопроса о происхождении жизни.

Глава 10. В новое тысячелетие

Мы увидели, какую роль квантовая механика сыграла в столь многих областях физики и химии и какое влияние она оказала на них, а также узнали, насколько важной она стала для технологического прогресса прошедшего века, поспособствовав появлению таких технологий, как лазер, полупроводник и ядерный реактор. В последней главе нам пора вернуться к основным идеям, включая суперпозицию, запутанность и декогеренцию, и посмотреть, какую роль они могут сыграть в технологиях XXI века.

Умные эксперименты

Интересно, как бы Нильс Бор поступил с целым рядом невероятных экспериментальных прорывов в области атомной физики и квантовой оптики, произошедших за последнее десятилетие? Пионеры квантовой мысли настаивали, что предсказания квантовой механики имеют смысл только при ее применении к большому количеству (или скоплению) идентичных квантовых систем. Кроме того, они утверждали, что между микроскопическим миром, где действуют квантовые законы, и макроскопическим миром измерительных приборов, подчиняющихся законам классической физики, должна проходить четкая граница.

Оба этих ограничения теперь сняты, поскольку исследователи уже работают с отдельными атомами и фотонами.

Здесь и нашлось еще одно применение для невероятно точных лазеров – они стали устройством для манипулирования отдельными атомами. Когда атомы с помощью электромагнитных полей помещают в ультравысокий вакуум, точно настроенные и нацеленные лазеры могут использоваться на их охлаждения. Должен заметить, что наличие у атомов «температуры» просто означает, что атомы не стоят на месте: чем более возбужден атом, тем выше его температура. Свет лазера заставляет атом терять энергию и «остывать». Сегодня лазеры могут спокойно использоваться для охлаждения атомов до температуры, которая менее чем на одну тысячную градуса выше абсолютного нуля. Затем они могут функционировать в качестве оптических пинцетов, чтобы удерживать атомы на месте, а также толкать их при помощи точных импульсов энергии, тем самым отправляя их в квантовые суперпозиции и запутанные состояния.

Примечательно, что эти техники удалось успешно применить лишь в последнее десятилетие прошлого века, поэтому в последние несколько лет на страницах журнала *Nature* то и дело появлялись статьи об этой удаче. Мы наконец можем изучить границу квантового и классического миров.

Вот пример того, как быстро меняются идеи. Студентов-физиков долгое время учили, что «увидеть» можно только объект, размерами не меньше длины волны того света, который на него направляют. Это привело к изобретению электронного микроскопа, описанного в предыдущей главе. Длина волны видимого света составляет примерно половину микрона (одной тысячной миллиметра), а атомы более чем в тысячу раз меньше. Теперь учебники надо переписывать: сегодня исследователи без особого труда могут ловить отдельные атомы, рассматривать и отслеживать их и вообще манипулировать ими на свое усмотрение, используя лазерные пучки видимого света.

Прежде чем я расскажу, как некоторые из этих техник в будущем смогут быть использованы для создания устройства, называемого квантовым компьютером, давайте рассмотрим несколько экспериментов. Каким образом видимый свет может позволить нам разглядеть нечто столь малое, как атом? Длина его волны для этого явно слишком велика.

Как отследить атом

Сегодня физики могут обнаруживать образец размером несколько тысяч атомов, направляя на него свет, но происходит это не так, как вы думаете: они не просто отражают свет от образца, как при использовании микроскопа. Если частота света настроена таким образом, чтобы его фотоны обладали энергией, которая, согласно формуле Планка, соответствует энергии атомного перехода, то некоторые фотоны поглощаются атомами. Не забывайте, что под переходом подразумевается лишь то, что один из электронов атома перепрыгивает на более высокий энергетический уровень. Таким образом, используя свет этой «резонирующей» частоты, мы наблюдаем сокращение общего количества фотонов, поскольку несколько тысяч особенно смелых фотонов жертвуют собой ради атомов. Так мы и узнаем о наличии атомов.

Связанная с этим весьма хитроумная идея позволяет обнаружить единичный атом. Вместо того чтобы светить на него лазерным светом, настроенным на резонирующую частоту, мы смотрим, что происходит со светом, частота которого не позволяет ему быть поглощенным. Сначала отдельные атомы ловятся и охлаждаются, а затем по одному впускаются в крошечное устройство, называемое оптическим резонатором, длина которого составляет малую долю миллиметра, а стенки обладают высоким индексом отражения. Внутри резонатора направляется свет очень слабого лазера, в результате чего в любой момент времени вместе с атомом от стенок отражается в среднем всего один фотон! Каждый раз, когда этот фотон встречается с атомом, он чуть замедляется при движении «сквозь» атом^[73] (точно так же, как свет замедляется при движении сквозь воду или стекло). Это вызывает

небольшое изменение волновой функции протона, которое постепенно нарастает, пока он тысячи раз проходит сквозь атом, и в конце концов эффект становится измеримым.

Физики Института квантовой оптики общества Макса Планка в Германии использовали эту технику, чтобы отследить траекторию атома, движущегося внутри резонатора. Само собой, происходящее в таком случае равносильно постоянному наблюдению за атомом, поэтому он всегда ведет себя, как классическая частица.

Наблюдая декогеренцию в действии

Ряд экспериментов в сфере квантовой оптики действительно привел к появлению громких заголовков в научных журналах последних лет. Три четверти века физики-теоретики и философы обсуждали такие фундаментальные идеи, как где проходит граница между квантовым и классическим мирами, используя мысленные эксперименты и аргументы, основанные на различных подходах к интерпретации квантовой механики. Теперь эти идеи наконец-то можно проверить в лабораторных условиях.

В Главе 5 я описал, как декогеренция решила один из фундаментальных вопросов, связанных с проблемой измерения, объяснив, почему мы никогда не видим котов живыми и мертвыми одновременно. Феномен декогеренции доказывает, как мы вполне справедливо ожидаем, что четкой границы между микро – и макромиром не существует – просто эффект интерференции суперпозиций исчезает тем быстрее, чем сложнее становится квантовая система. Интерференции чрезвычайно быстро пропадают, когда квантовая система вступает в контакт с макроскопической окружающей средой. Следовательно, хитрость в том, чтобы изучать «мезоскопические» системы, которые находятся где-то посередине между микро – и макромиром, и надеяться, что рано или поздно нам удастся увидеть декогеренцию в действии.



В 1996 году в Боулдере (Колорадо) был проведен эксперимент, воссоздавший первое «состояние кота Шрёдингера» на атоме, сначала поймав его в ловушку силового поля, а затем замедлив его движение посредством охлаждения лазером. Еще два лазера применялись для «вынужденного» ввода атома в суперпозицию пребывания в двух местах одновременно.

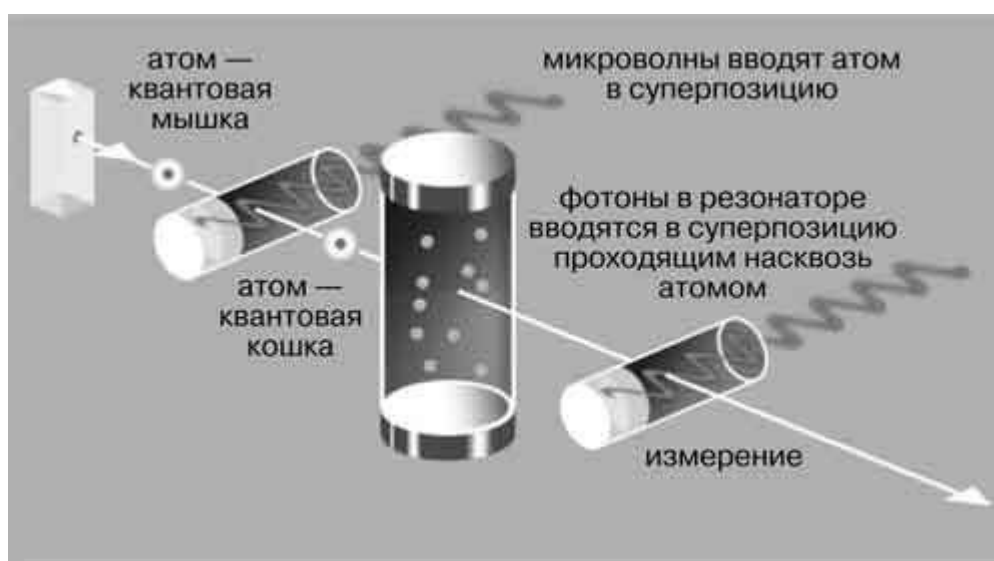
В мае 1996 года группа экспериментаторов Национального института стандартов и технологий (NIST) в Боулдере (Колорадо) создали, как они выразились, подобное «состоянию кота Шрёдингера» состояние, поместив на место кота отдельный атом. Сначала они поймали атом и лазером охладили его до температуры, настолько близкой к абсолютному

нулю, насколько это возможно без нарушения принципа неопределенности^[74], а затем подтолкнули его серией контролируемых лазерных импульсов, которые ввели атом в суперпозицию двух различных квантовых состояний, основанных на энергии его внешних электронов.

Само по себе это не представляет особенного интереса. Атомы часто пребывают в суперпозициях. Интересно, что лазеры сделали различные состояния атома квантово запутанными с состояниями его движения, поэтому он оказался и в суперпозиции движения одновременно в двух направлениях. Атом колеблется в своей ловушке, причем два состояния движутся совершенно не в фазу. Когда они расходятся дальше всего, между ними оказывается расстояние, почти в тысячу раз превышающее диаметр атома. Обратите внимание, что под «ними» я подразумеваю две части волновой функции одного атома.

Но я-то знаю, что волновые функции не локализованы в пространстве, так что в подобном поведении нет ничего необычного. И все же каждая колеблющаяся часть волновой функции распространяется всего на одну десятую максимального расхождения между двумя частями. Именно поэтому описываемая ситуация отличается от обычного эксперимента с двумя прорезями. В конце концов, атом, который проходит сквозь обе прорези, тоже пребывает в суперпозиции нахождения в двух местах одновременно. Но в этом случае две части волновой функции распространяются, как только прорези пройдены, и накладываются друг на друга, а следовательно, интерферируют. Здесь же каждая часть волновой функции остается локализованной и не распространяется в пространстве. Когда две части оказываются в точке максимального расхождения, наложения практически не происходит.

Как только ученые научились воссоздавать такие мезоскопические состояния кота Шрёдингера, следующим шагом стало их применение в изучении природы декогеренции. К декабрю 1996 года был проведен первый успешный эксперимент в этой сфере, который осуществила группа ученых под руководством Сержа Ароша, работавшая в Высшей нормальной школе (ENS) в Париже. Вместо того чтобы просто ввести атом в суперпозицию, они сумели запутать состояние атома с электромагнитным полем, состоящим всего из нескольких фотонов, заключенных внутри резонатора. Таким образом электромагнитное поле было тоже введено в суперпозицию колебания в двух разных фазах одновременно.



Парижский эксперимент 1996 года впервые доказал, что декогеренция представляет собой реальный физический процесс. Изучая состояния двух атомов (квантовой кошки и квантовой мышки), проходящих сквозь резонатор, содержащий электромагнитное поле в суперпозиции, можно измерить, насколько быстро произошла декогеренция поля.

Далее ученые измерили, как долго электромагнитное поле может пребывать в этой квантовой суперпозиции. Взаимодействие с окружающей средой происходило, как только из резонатора выходил хотя бы один фотон, который выдавал квантовое состояние внешнему миру. Чтобы измерить, насколько быстро это случалось, ученые отправляли второй атом, который называли квантовой мышкой^[75], который сам оказывался запутанным с квантовым состоянием поля. Это приводило к возникновению поддающейся измерению интерференции между различными частями волновой функции второго атома. Изменяя временной интервал перед запуском атома-мышки, ученые наблюдали декогеренцию в действии. Скорость потери суперпозиции электромагнитного поля зависит от того, насколько «не в фазе» пребывали два компонента. Обычно время декогеренции можно было растянуть до десятой доли миллисекунды. Наконец-то ученым удалось неопровержимо доказать, что декогеренция реальна.

В последние годы возник интерес к перспективам так называемого моделирования сред, которое предполагает сдерживание декогеренции путем как можно более долгого поддержания квантовых суперпозиций пойманных в ловушку атомов. Как же это делается? И снова с помощью лазеров. Но эта задача гораздо сложнее и требует совместной работы многих лазеров. Нужны лазеры, которые ловят атом, лазеры, которые его охлаждают, и лазеры, которые вводят его в суперпозицию. В общем, в лазерной промышленности не заскучаешь!

Рекордная запутанность

Наблюдение декогеренции в действии и контроль за нею с успехом применяются в развивающихся сферах квантовой криптографии, квантовых вычислений и квантовой телепортации, которые я опишу чуть дальше в этой главе. Но прежде мне стоит кратко упомянуть о недавнем прогрессе в укрощении еще одного фундаментального свойства волновой функции – квантовой запутанности.

Когда я перейду к описанию квантовых вычислений, мы увидим, что для максимально эффективного использования квантовых суперпозиций необходимо запутать как можно больше квантовых состояний. В 1990-е годы различные группы исследователей успешно запутывали по два-три атома или фотона, но это было нелегко. Взаимодействие с окружающей средой любой из запутанных частиц приравнивалось к измерению и приводило к коллапсу деликатных суперпозиций, которые рушились, подобно карточному домику. Затем в марте 2000 года группа ученых из NIST опубликовала на страницах журнала *Nature*^[76] отчет об успешном применении новой техники запутывания вереницы из четырех пойманных в ловушку атомов. Каждый атом вводился в суперпозицию, после чего все четыре запутывались вместе. Этот метод, как утверждали ученые, был вполне применим и к гораздо большему количеству частиц.

О другом прорыве в сентябре 2001 года сообщила группа из датского города Орхус, которой удалось запутать квантовые состояния двух макроскопических объектов – образцов газа цезия, в каждом из которых содержались триллионы атомов! Запутанность продолжалась почти целую миллисекунду. Так, не смейтесь. Я понимаю, что миллисекунда довольно коротка, но это все же очень впечатляющий результат. Видите ли, если каждый из образцов пребывал в суперпозиции двух состояний, в каждом из которых атомы вели себя одинаково – все занимали одно энергетическое состояние или вращались в одну сторону, – то выход всего одного атома выдавал состояние всего образца, приводя к коллапсу суперпозиции. Это предполагает, что время декогеренции составляло менее одной фемтосекунды^[77]. Однако ученые смогли поддержать запутанное состояние в триллион раз дольше!

Чтобы достичь такого результата, они не стали вызывать так называемую максимальную запутанность, в которой все атомы в каждом из образцов ведут себя одинаково. Вместо этого они ввели оба образца атомов в суперпозицию двух состояний, в каждом из которых чуть более половины атомов вращалось в одну сторону, а остальные вращались в другую.

Таким образом, если атом просачивался наружу и выдавал направление своего спина, этого было недостаточно для коллапса волновой функции всего образца до одного из состояний, так как состояние спина этого атома могло оказаться любым из состояний всего образца. Следовательно, потеря когерентности в состоянии отдельного атома, который вырывается наружу, приводит лишь к незначительному нарушению общей суперпозиции. Значит, выяснение состояния одного атома не приравнивается к измерению состояния всего образца.

Квантовая криптография

Вышеописанные техники представляют собой не просто удачное описание самых странных аспектов квантовой механики. Они имеют и практическое применение: с их помощью, возможно, однажды претворится в жизнь мечта о создании квантового компьютера. Но запутанность уже удалось применить на практике. Сфера ее использования называется квантовой криптографией.

Сначала я опишу, чем занимается классическая криптография. Если вы хоть раз задумывались, насколько безопасно давать номер своей кредитной карты при совершении покупок онлайн, поверьте, беспокоиться не стоит. Пока что это чрезвычайно безопасно. Математики годами искали способы позволить двум сторонам обмениваться информацией в атмосфере полной секретности. Стандартом этого стала отправка закодированного сообщения в надежде, что шпион не сумеет взломать код. Есть целый ряд хитрых фокусов для обеспечения безопасности зашифрованных сообщений, например схемы «открытых ключей». Простейшая форма этой идеи основана на следующем примере. Если я хочу получить от вас тайное сообщение, я посылаю вам пустую, открытую, непробиваемую коробку и открытый висячий замок, ключ к которому есть только у меня. Вы кладете сообщение в коробку и навешиваете замок, после чего отправляете ее обратно мне. Замок таков, что открыть его можно только моим ключом.

На практике системы вроде этой основываются на идее, что определенные математические операции легче совершить в одном направлении, чем в другом, например умножение и разложение на множители. Если я скажу вам, что x умножить на y равняется 37523, сколько времени вам понадобится, чтобы разложить произведение на множители и сообщить мне значения x и y ? Но если я задам вам обратную задачу, скажу, что 239 умножить на 157 равняется z и попрошу вычислить z , уверен, вы дадите ответ гораздо быстрее. Самый популярный метод шифрования с открытым ключом основан на сложности факторизации очень больших чисел. Это занимает много времени даже у мощнейших компьютеров. К примеру, на факторизацию тысячезначного числа уходит больше времени, чем возраст Вселенной, даже при использовании мощнейшего в мире компьютера!

Однако, если когда-нибудь мы сумеем создать квантовый компьютер, у нас может появиться способ гораздо более быстрой факторизации чисел. Если это произойдет, безопасность современных систем шифрования очень быстро окажется под угрозой. Впрочем, даже в отсутствие квантовых компьютеров нельзя забывать о прогрессе в математике, который может привести к открытию алгоритма для факторизации больших чисел. К счастью, есть и другой тип криптографии, который гарантирует полную безопасность и основывается на квантовой механике.

Главная идея квантовой криптографии заключается в разрешении передачи криптографического «ключа» между удаленными друг от друга сторонами – которые в литературе называют Алиса (отправитель) и Боб (получатель) – в условиях абсолютной

безопасности, обеспечиваемой законами физики. Этот ключ позволяет отправителю зашифровать, а получателю расшифровать текст послания. Так что квантовую криптографию корректнее называть квантовым распределением ключей.

В настоящее время разработаны две техники. Обе основаны на том, что, согласно квантовой механике, любая попытка шпиона перехватить ключ предполагает некоторое измерение, а это неизбежно нарушает состояние системы и предупреждает отправителя и получателя. Первая техника, протокол Беннета – Брассара, названный в честь ученых, которые изобрели его в 1984 году, полагается на идею о том, что Алиса и Боб проводят измерения и обмениваются фотонами. Определенные свойства этих фотонов, в частности их поляризацию, затем можно преобразовать в бинарную последовательность нулей и единиц, чтобы создать ключ. Не вдаваясь в технические детали, скажу, что в основе этого метода лежат квантовая суперпозиция и принцип неопределенности.

В начале 1990-х годов Артур Экерт открыл второй протокол, который основывается на феноменах нелокальности и запутанности. Здесь Боб посылает Алисе один из пары запутанных фотонов, который она каким-то образом измеряет и отправляет обратно. Затем Боб проводит измерение комбинированного состояния, с помощью которого выясняет, какое именно измерение произвела Алиса. Его знание о серии измерений Алисы и составляет ключ. Любая попытка шпиона перехватить фотон окажет влияние на его партнера и предупредит Боба.

Закон Мура

Не знаю, хранится ли он до сих пор в одном из темных углов моей квартиры, но более двадцати лет назад я купил свой первый программируемый компьютер. Это был Sinclair ZX81^[78] с процессором частотой 3 МГц и одним килобайтом памяти. Я добавил дополнительную память, подсоединив к нему плату ОЗУ на 16 килобайт, которая хотя бы дала мне возможность набирать более одного экрана кода, прежде чем память заполнялась до отказа. Но любой незначительный толчок – и физическое соединение, обеспечиваемое неисчерпаемым запасом клея-пластилина, разрывалось, стирая все, что я успел напечатать. В общем, использовать этот компьютер мне удавалось только для создания коротких программ для расчета данных для моих лабораторных отчетов, что занимало бы существенно больше времени при применении карманного калькулятора. Ноутбук, на котором я работаю сегодня, по размеру сравним с тем компьютером, но снабжен процессором частотой 1000 МГц (в триста раз быстрее) и 15 гигабайтами дискового пространства (в миллион раз больше). При этом ему уже больше года, так что его нельзя назвать последним словом техники.

В 1965 году один из основателей компании *Intel* Гордон Мур предсказал, что в обозримом будущем мощность компьютеров будет удваиваться каждые восемнадцать месяцев. Его предсказание, теперь называемое законом Мура, оказалось на удивление точным, и теперь нам всем известно, что наши компьютеры необходимо регулярно обновлять, чтобы они поддерживали все более и более сложные программы. Но сколько еще так может продолжаться? Знаем ли мы, когда произойдет нарушение закона Мура?

Оказывается, мы действительно знаем, когда это случится, при условии что нынешний вектор развития технологий останется неизменным. В предыдущей главе я упомянул, что лазеры используются для вырезания крошечных узоров интегральных микросхем на поверхности кремниевых чипов. Повышение компьютерной мощности зависит от постоянной миниатюризации этого процесса. Учитывая современное развитие технологий, это будет без проблем продолжаться еще около двадцати лет, по мере того как длина волны лазера будет становиться все короче и короче. Однако было высказано предположение, что закон Мура резко перестанет действовать через пять-десять лет из-за неизбежной проблемы повышения миниатюризации, которая называется тепловым шумом. Но даже без нее мы в

конце концов наткнемся на так называемый «первый» барьер. Это произойдет, когда длина волны лазерного пучка станет такова, что ширина каждого транзистора микрочипа будет составлять всего 0,1 микрона. Это означает, что около одной тысячи транзисторов, расположенных вплотную друг к другу на чипе, можно будет разметить на срезе человеческого волоса. К этому моменту длина волны лазеров будет находиться глубоко в ультрафиолетовом диапазоне и нам придется искать другую технику создания еще более тонких пучков с гораздо более короткими длинами волн. Альтернативой дальнейшей миниатюризации чипов может стать замена кремния арсенидом галлия. Атомное строение этого полупроводящего материала позволит размещенным на его поверхности микросхемам гораздо быстрее проводить электричество.

В итоге мы достигнем другого барьера, называемого критерием Рэлея, который гласит, что минимально разрешимые элементы чипа должны быть не меньше, чем половина длины волны пучка. По достижении этой стадии нам следует начать учитывать квантово-механические эффекты. К примеру, сейчас изучается возможность использования квантовой запутанности фотонов лазерного пучка, чтобы отодвинуть этот барьер, но, скорее всего, ненамного.

Как только мы дойдем до молекулярных масштабов, что произойдет примерно к 2020 году, век полупроводниковых чипов закончится. Исследователи уже ищут альтернативы, и две области кажутся довольно перспективными. Первая связана с использованием биомолекулярных компьютеров, которые основываются на способности молекул ДНК хранить невероятное количество информации, благодаря чему однажды они могут быть применены для создания молекулярных логических схем. Другая заключается в возможности использования квантовых транзисторов, которые полагаются на свойства отдельных электронов, искусственно помещенных в «квантовые колодцы» немногим больше атома. Немного изменяя напряжение в этих колодцах, мы можем контролировать поведение электронов подобным действием транзистора способом.

Все вышеописанные достижения представляют собой не просто спекуляцию и помогут росту компьютерной мощности еще при нашей жизни. Однако все большее число квантовых физиков работает над настоящей проверкой квантовой странности. Они не сомневаются, что в этом веке им удастся создать величайшую квантовую машину – квантовый компьютер.

Кубиты

В начале 1980-х годов, примерно в то время, когда я купил свой ZX81, физик Ричард Фейнман высказал предположение, что определенные проблемы, к примеру вопросы симуляции поведения квантовой системы, разумнее решать при помощи компьютера, который также действует по законам квантовой механики. Такой компьютер должен применять идею суперпозиции для создания совершенно новых типов алгоритмов. Вскоре исследование квантовых компьютеров выделилось в отдельную область науки, когда в 1985 году оксфордский физик Дэвид Дойч опубликовал прорывную статью, в которой показал, каким образом их создание достижимо на практике.

Дойч предложил схему «универсального квантового компьютера», подобно тому как за полвека до этого Алан Тьюринг предложил идею универсального классического компьютера. Машина Дойча работала на основании квантовых принципов и была в состоянии симулировать любой физический процесс. Она требовала ряд квантовых систем, каждая из которых могла существовать только в суперпозиции двух состояний, таких как атомы в суперпозиции пребывания на двух энергетических уровнях. Эти квантовые системы затем запутывались для создания квантовых логических вентилей, которые можно было настроить для выполнения определенных операций.

В основе этого лежала идея о «квантовом бите», или кубите. В обычном цифровом компьютере основным компонентом является «бит» – переключатель, который может находиться в одной из двух позиций: вкл. и выкл., которые обозначаются двоичными символами 0 и 1. Однако при использовании квантовой системы, такой как атом, этот компонент может пребывать в двух состояниях одновременно. Следовательно, кубит может быть одновременно и включен, и выключен, при условии что он остается изолированным от окружающей среды.

Само собой, отдельный кубит не очень полезен. Но если запутать два кубита или более, потенциал такой системы станет очевиден. Представьте информационное содержание трех классических битов. Каждый может принимать значение либо 0, либо 1, поэтому существует восемь различных комбинаций этой тройки (000, 001, 010, 100, 011, 101, 110, 111). Но всего три запутанных кубита позволяют нам хранить все восемь комбинаций одновременно! Каждая из трех цифр одновременно принимает значение и 0, и 1.

Добавление четвертого кубита дает нам 16 комбинаций, пятого – 32 и так далее. Объем хранимой информации увеличивается экспоненциально (как 2^N , где N – это число кубитов). Теперь представьте осуществление операций тем же способом, который мы применяем к классическим битам. Мы сможем выполнить 2^N вычислений одновременно, и это максимально возможная скорость параллельной обработки данных. Определенные проблемы, на решение которых у обычного компьютера ушли бы годы, в результате могут оказаться решены за долю секунды.

Так на что способен квантовый компьютер?

Все это звучит прекрасно, но как именно мы можем все это применить для решения реальной проблемы? В конце концов, если классические компьютеры становятся все быстрее и могут через Интернет связываться для параллельной работы, не сможем ли мы в итоге достичь такой производительности другими средствами? Ответ на эти вопросы был найден в 1994 году, когда Питер Шор, работая в Лабораториях Белла в Нью-Джерси, создал самый первый квантовый алгоритм – набор инструкций для выполнения задачи, справиться с которой под силу только квантовому компьютеру. Задача заключалась в невероятно эффективной факторизации больших чисел, что представляло собой одну из главных проблем компьютерной науки. Сразу стало очевидно, что квантовые компьютеры, если их создание вообще возможно, окажут огромное влияние на торговлю и банковское дело, поскольку безопасные в настоящее время методы шифрования с открытым ключом станут бесполезны и на сцену выйдет квантовая криптография.

Несколькими годами позже коллега Питера Шора математик Лов Гровер открыл другой квантовый алгоритм, который позволяет квантовому компьютеру осуществлять поиск по несортированной базе данных гораздо быстрее обычного поискового движка. Представьте простой пример: если бы я попросил вас найти конкретную карту в хорошо перетасованной колоде, вероятность вытащить ее с первого раза составила бы один к пятидесяти двум. Конечно, вам может повезти, но может и не повезти – и тогда, открывая одну карту за другой, вы найдете нужную лишь на последнем ходе. Попробовав произвести эту процедуру много раз, вы выясните, что в среднем вам понадобится двадцать шесть попыток (что равняется половине колоды). Используя алгоритм Гровера, квантовый компьютер может найти нужную карту в среднем за семь попыток. Математика такова: в базе данных из N элементов классическому компьютеру необходимо $N/2$ попыток, а квантовому компьютеру достаточно и квадратного корня из N .

Хотя алгоритм Гровера не так примечателен, как алгоритм его коллеги Питера Шора, без него не обойтись, скажем, в шахматном матче между классическим компьютером и квантовым компьютером, поскольку последний будет продумывать ходы в миллиарды раз быстрее.

Квантовые вычисления

Эндрю Стин, преподаватель физики, Оксфордский университет

Сегодняшние компьютеры, при всей их удивительности, работают на том же фундаментальном принципе, что и механические устройства, о которых в XIX веке мечтал Чарлз Бэббидж и которые впоследствии описал Алан Тьюринг: одно стабильное состояние такой машины соответствует одному числу. Этот принцип характерен даже для таких, казалось бы, нестандартных вычислительных моделей, как модель, основанная на ДНК. Что еще им остается? И все же мир вокруг нас описывают тонкие законы квантовой физики, которые предлагают нам иначе взглянуть на вычисления. Квантовая физика предлагает мощные методы манипулирования информацией, которые мы только начинаем понимать.

Квантовые вычисления сводят воедино две наиболее значительные концептуальные революции XX века: революцию в информационной науке и в квантовой физике. Как выяснилось, они прекрасно дополняют друг друга, потому что язык квантовой физики очень напоминает язык информации: квантовая волновая функция определяется как математическая сущность, которая описывает все свойства конкретной физической системы, поэтому волновая функция фактически представляет собой некоторый объем информации. Физические процессы заставляют ее меняться, поэтому, если мы разработаем соответствующие процессы, эволюция волновой функции станет формой поддающейся нашему контролю обработки информации. Очень важно, что в квантовых вычислениях эта квантовая эволюция может использоваться для создания недоступных для других устройств удобных упрощений целого ряда вычислительных моделей.

Простейшей единицей квантовой информации является кубит, квантовый родственник классического «бита» – переключателя, который может принимать одно из двух значений, 0 или 1, в то время как кубит может пребывать в суперпозиции, соответствующей 0 и 1 одновременно. Один кубит может храниться в одном атоме или в одном фотоне света. На следующем этапе проявляется вся тонкость и эффективность квантовых вычислений. Если бы мы могли лишь манипулировать многими кубитами по отдельности, достижимая таким образом вычислительная мощность не давала бы форы обычным компьютерам. Однако, согласно квантовой физике, кубиты могут пребывать в запутанных состояниях. Это такие состояния, в которых состояние одного кубита находится в тесной корреляции с состоянием его партнера. Например, они могут пребывать в состоянии, где они гарантированно хранят в себе одно и то же число (оба 0 или оба 1), но при этом ни один из кубитов сам по себе не хранит ни 0, ни 1.

В квантовом компьютере используются запутанные состояния с участием множества кубитов. Изначально компьютер создается со всеми кубитами в простом состоянии вроде 0 (все они вращаются в одну сторону – вверх или вниз). Затем кубиты связываются друг с другом посредством квантовых «логических вентилях», которые заставляют спин одного кубита оказаться в запутанном состоянии со спином другого кубита, причем детали задаются программой, находящейся под управлением машины. Процесс продолжается, но программа написана таким образом, что по его завершении кубиты снова распутываются – то есть возвращаются в простые состояния, такие как вниз или вверх (0 или 1). Итоговое состояние всего набора дает нам результат вычисления. Его можно узнать посредством проведения измерений на кубитах.

Пока неясно, как лучше всего понять вычислительное преимущество, обеспечиваемое запутанностью. Одна из ее черт заключается в том, что, так как каждый кубит может добавить и 0, и 1 к любому заданному состоянию, всякий раз, когда к компьютеру добавляется один кубит, количество добавлений к состоянию компьютера удваивается, что

приводит к поистине огромному числу добавлений (например, $2^{100} = 1267$ миллиардов миллиардов миллиардов всего для 100 кубитов). В некоторых отношениях квантовый компьютер действует как совокупность огромного числа традиционных компьютеров, одновременно проводящих вычисления! Однако эта картина не дает полного представления о происходящем, потому что отдельные звенья любого такого квантового вычисления не могут быть полностью независимыми, а также должны снова оказываться вместе (и вступать в интерференцию друг с другом) до получения осмысленного результата.

В самой знаменитой квантовой программе, алгоритме факторизации Шора, запутанность используется, чтобы позволить двум группам кубитов хранить набор взаимосвязанных чисел, где каждое число во второй группе задается фиксированной математической операцией (например, возведением в степень), проводимой над соответствующим числом из первой группы. Квантовая программа велит компьютеру манипулировать первой группой таким образом, чтобы посредством чудес запутанности проявилось общее свойство всех чисел во второй группе, то есть чтобы выяснилось, все ли они четные, или открылись все кратные какого-то неизвестного числа. Эту информацию можно использовать для определения простых множителей любого целого числа, что, по случайности, приведет ко взлому самых секретных схем шифрования, в настоящее время используемых в мире бизнеса и политики.

Сейчас ученые хотят как можно быстрее построить первый квантовый компьютер, но запутанность представляет собой очень тонкое свойство и пока достаточно точный контроль за большим количеством кубитов остается за пределами наших технологических возможностей.

Квантовые логические вентили

Логический вентиль представляет собой вычислительное устройство, которое выполняет простую операцию при загрузке в него одного или более битов информации. Применяемый им для этого способ основан на области математики, известной как «Булева алгебра», которая названа в честь Джорджа Буля, разработавшего ее в XIX веке. Сложные логические схемы, из которых состоит «мозг» компьютера, собраны из таких вентилях, которые получают входящий сигнал из бинарных единиц и нулей, а затем следуют простым инструкциям, чтобы что-нибудь с ними сделать. Транзистор выступает в качестве логического вентиля, выполняющего такую операцию посредством преобразования двух входящих сигналов, каждый из которых может быть как 0, так и 1, в единственный исходящий сигнал, принимающий значение либо 0, либо 1.

Существуют различные типы логических вентилях, например вентиль «И» (на выходе будет единица, только если на входе получены две единицы) или вентиль «ИЛИ» (на выходе будет единица, когда на входе получены либо одна, либо две единицы). Создание комбинаций этих простых вентилях, а также вентиля «НЕ» (который берет один из входящих сигналов и переключает его: 0 на 1 или 1 на 0) позволяет конструировать более сложные логические операции. Так, комбинация двух вентилях «НЕ», двух вентилях «И» и одного вентиля «ИЛИ» дает элементарное устройство сложения (называемое вентилем «исключающее ИЛИ»).

Квантовая логика работает сходным образом, только теперь нам приходится отслеживать все возможности. Квантовые алгоритмы вроде алгоритмов Шора и Гровера основываются на особом порядке, в котором логические операции производятся над двумя или более кубитами. Однако вместо подачи электрического тока на полупроводниковые диоды мы теперь манипулируем суперпозициями квантовых состояний при помощи лазеров и магнитных полей.

Простейший пример кубита представляет собой отдельный электрон (или любая частица с квантовым спином, который может быть либо параллелен, либо антипараллелен действующему магнитному полю). Под действием дополнительного электромагнитного импульса в течение нужного периода времени спин электрона может развернуться. Это пример квантового вентиля «НЕ». Другая квантовая операция соответствует развороту спина электрона лишь наполовину. Это вводит его в суперпозицию вращения вверх (1) и вниз (0) одновременно. Такая операция называется операцией «квадратный корень из НЕ». Имея два запутанных электрона, которые начинают с вращения в одну сторону, эта операция вводит их в суперпозицию четырех возможных состояний: 00, 01, 10 и 11. Большое количество кубитов позволяет строить более сложные квантовые алгоритмы. Например, исследователи с успехом создали квантовый эквивалент вентиля «исключающее ИЛИ», позволяющего им осуществлять простое сложение.

Как только алгоритм осуществлен, выбирается одно из возможных итоговых состояний, которое затем необходимо усилить таким образом, чтобы его можно было считать с помощью какого-либо макроскопического устройства. Само собой, это лишь одна из многих важнейших проблем реализации, которые еще предстоит разрешить.

Квантовое клонирование

Многие удивительные новые достижения и перспективные будущие применения квантовой механики, такие как квантовая криптография и квантовые вычисления, основываются на относительно новой области квантовой информационной теории. Со всеми этими технологиями связано еще не до конца изученное квантовое клонирование.

Хотя мы знаем об успехах в генетике и клонировании животных, а однажды, возможно, и людей, важно подчеркнуть, что в этих случаях клон не идентичен оригиналу, а лишь наделен той же генетической схемой. В квантовой механике клон во всех отношениях идентичен частице или квантовой системе, с которой он скопирован. В 1982 году Уильям Вуттерс и Войцех Зурек вывели простое математическое доказательство невозможности идеального клонирования произвольной квантовой системы. Конечно, если мы заранее знаем квантовое состояние, теоретически мы можем сконструировать устройство для квантового клонирования, которое будет производить идентичные копии этого состояния, однако ни одно такое устройство не будет универсально применимо к любой квантовой системе.

Чтобы клонировать объект, нам прежде всего нужно получить всю информацию о нем. Это достигается путем проведения измерений. Собрав все необходимые сведения, мы можем использовать их для конструирования клона. Но вы уже видели, что измерение квантовой системы не позволяет нам этого – в процессе измерения что-то неизменно теряется. Это происходит потому, что мы конвертируем квантовую информацию в классическую. Например, фотон, пребывающий в произвольной суперпозиции различных состояний спина или поляризации, при измерении откажется от одного из этих состояний, но не от суперпозиции. Следовательно, мы не можем знать относительную амплитуду разных частей оригинальной суперпозиции или то, как именно они комбинируются (их фазу). Для клонирования этого недостаточно.

После доказательства Вуттерса и Зурека ученые выяснили, что теоретически они могут сконструировать так называемое универсальное квантовое устройство клонирования, которое, не будучи совершенным, может обладать определенным коэффициентом успешности, или «точностью».

Квантовое клонирование может оказаться полезным, если мы когда-нибудь сумеем построить квантовый компьютер. Вместо осуществления последовательности операций на кубите, этот кубит можно будет сначала несколько раз клонировать и обеспечить тем самым гораздо более

эффективную обработку данных при одновременной работе всех клонов. Более важно в настоящее время понять, насколько безопасной будет квантовая криптография, если шпион сможет создавать хотя бы примерные клоны фотонов, используемых для передачи сообщений.

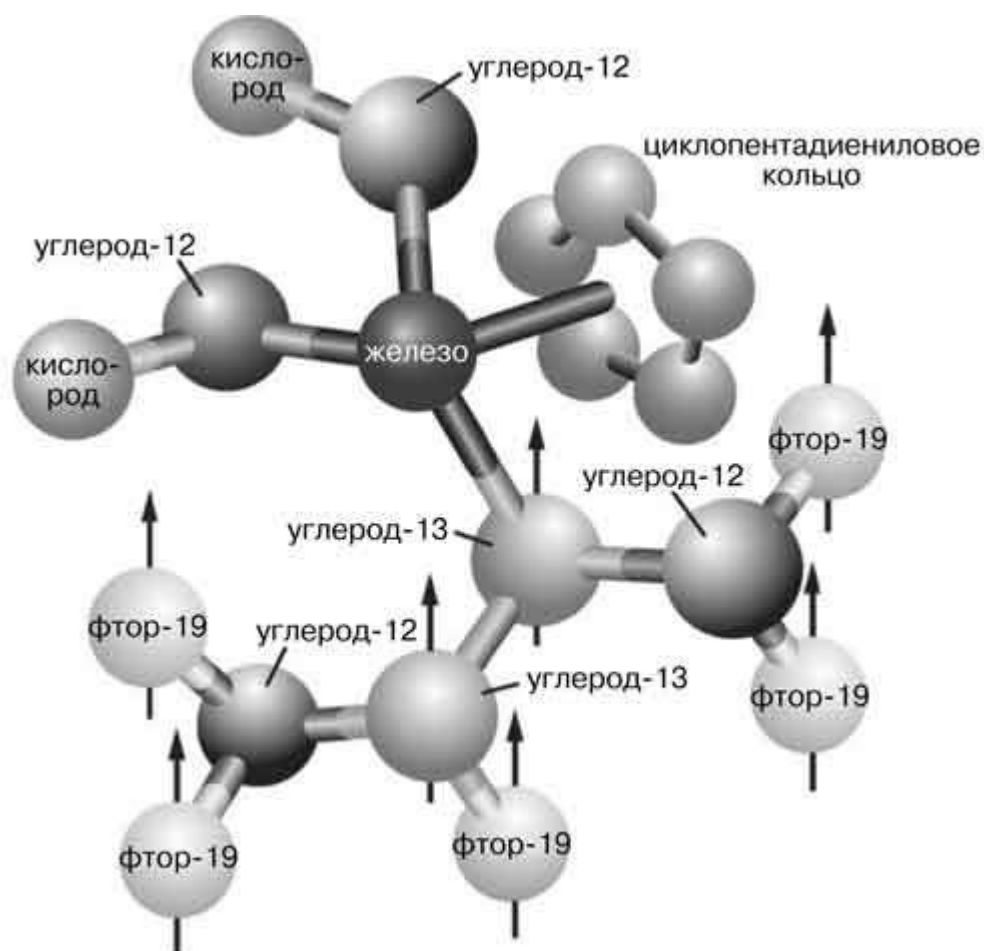
Как построить квантовый компьютер

В настоящее время существует несколько способов реализации мечты о практическом создании квантового компьютера. В основе всех этих способов лежит идея манипуляции запутанными суперпозициями атомов, но все они в итоге сталкиваются с одной и той же проблемой: как не допустить возникновения декогеренции, которая может разрушить все тонкие вычисления. Я опишу две техники, которые исследуются в настоящее время. Одна из них эксплуатирует идею лазерного манипулирования ультрахолодными атомами, а другая использует ЯМР (ядерный магнитный резонанс).

Первый метод я уже упоминал при описании различных экспериментов, проведенных в Париже (группа ENS) и в Колорадо (группа NIST). К примеру, группа NIST предложила способ, переключаясь с оригинальной идеей Дэвида Дойча из его статьи 1985 года. Они предложили поймать цепочку атомов, отстоящих друг от друга примерно на двадцать микронов, в так называемый квантовый процессор с ионной ловушкой. Пары пересекающихся лазерных пучков вводят каждый атом (выступающий в качестве одного кубита) в суперпозицию двух энергетических состояний. Атомы на самом деле представляют собой заряженные ионы и потому чувствуют электрическое отталкивание друг друга, а следовательно, находятся во взаимодействии и в общем запутанном состоянии. Они контролируемым образом вибрируют, и их относительное движение связывается путем обмена квантами вибрационной энергии.

Можно также использовать технику ядерного магнитного резонанса, где спин атомных ядер в специально сконструированных молекулах контролируется магнитным полем и каждое ядро ведет себя, как миниатюрный стержневой магнит. Конечно, мы не можем отследить состояния спина отдельного ядра, но здесь значение имеют, скорее, общие свойства материала, содержащего сто миллиардов триллионов молекул. Каждая молекула представляет собой квантовый процессор ЯМР, а кубитами становятся ядра атомов, из которых состоит молекула.

Примером такой молекулы служит молекула хлороформа, состоящая из пяти атомов (один углерод, три хлора и один водород). Вместо того чтобы использовать обычный изотоп углерода, углерод-12, ядро которого обладает нулевым совокупным спином, мы используем редкий изотоп углерод-13. Его ядро обладает спином из-за содержащегося в нем лишнего нейтрона. Это ядро, как и протон (ядро атома водорода), может обладать двумя различными направлениями спина (они характеризуются полуцелым спином, поэтому их спин может быть ориентирован «вверх» или «вниз»). Воздействуя на протон радиочастотным импульсом, мы вводим его в суперпозицию вращения в обе стороны одновременно. Непосредственная близость двух ядер и их химическая связь внутри молекулы обеспечивают запутанность их состояний, в результате чего суперпозиция спина протона переходит на ядро углерода^[79].



Первоклассный семикубитный квантовый компьютер, созданный в 2001 году учеными из Стэнфордского университета и Альмаденского исследовательского центра IBM в Калифорнии. Этой молекуле, известной как перфторбутадиенил-железо-комплекс и используемой в ЯМР-системе, первой удалось успешно применить алгоритм Шора для факторизации числа, пускай им и было всего лишь число 15!

Наконец, я кратко упомяну еще одну из нескольких других сегодняшних идей создания квантового компьютера. Эта идея, до сих пор находящаяся в зачаточном состоянии, основывается на двух применениях квантовой механики, которые я подробно описывал в прошлой главе: лазере и микрочипе. Облако атомов, при помощи лазера охлажденных до одной тысячной градуса над абсолютным нулем, можно заставить проплыть над полупроводниковым чипом посредством магнитных полей, генерируемых крошечными электрическими токами, текущими по интегральным микросхемам чипа. Высоту и скорость движения атомов можно контролировать при их направлении по границам магнитного поля. Таким образом можно точно контролировать запутанность квантовых состояний этих атомов.

Препятствием для создания любого типа квантового компьютера в настоящее время является вопрос изоляции деликатных суперпозиций от окружающей среды. Чем больше кубитов оказываются в запутанном состоянии, тем быстрее происходит декогеренция. Однако прогресс сегодня наблюдается на всех фронтах. Например, в процессоре с ионной ловушкой способ взаимодействия ионов с окружающей средой можно контролировать при условии осмотрительного выбора условий окружающей среды.

Квантовый мозг

Осталась лишь одна интерпретация квантовой механики, которую мы пока не обсудили. Она заслуживает упоминания по двум причинам. Во-первых, ее автором выступил один из самых уважаемых специалистов в сфере математической физики своего поколения – Роджер Пенроуз. Во-вторых, она может объяснить единственную область науки, которая представляется еще более загадочной, чем квантовая механика: происхождение сознания.

Согласно Пенроузу, коллапс суперпозиций различных квантовых состояний происходит не из-за проведения измерения, не из-за присутствия сознательного наблюдателя и даже не из-за взаимодействия с окружающей средой. Пенроуз полагает, что коллапс происходит даже в изолированной системе посредством физического процесса, связанного с самой природой пространства-времени. Согласно Пенроузу, «объективная редукция», или коллапс, волновой функции объясняется различной пространственно-временной геометрией каждого состояния суперпозиции. (Следовательно, если частица находится в суперпозиции пребывания в двух местах одновременно, пространство-время будет по-разному искривляться в зависимости от того, где более вероятно обнаружение массы этой частицы.) Как только разница геометрий доходит до критического уровня, как происходит, когда частица оказывается запутанной с окружающей средой, суперпозиция становится нестабильной и схлопывается до одного из возможных состояний. Само собой, ни Пенроуз, ни кто-либо еще не знает всех тонкостей этого механизма, поскольку у нас еще нет полной теории квантовой гравитации.

Пенроуз и Стюарт Хамерофф применили эту интерпретацию, чтобы объяснить, как может переключаться сознание в пределах мозга. Мне следует сперва пояснить, что они обращаются к квантовой механике, поскольку считают, что способ нашего «мышления» фундаментально отличается от метода обработки алгоритмов компьютером. Эта невычислимость сознательной мысли, по их мнению, должна требовать чего-то выходящего за пределы классической физики, а именно квантовой физики. Пенроуз и Хамерофф считают, что нашли верный биологический сосуд для защиты деликатной квантовой когерентности от воздействия окружающей среды внутри мозга.

Нейроны мозга содержат полые цилиндрические полимеры, называемые микротрубочками. Они, в свою очередь, состоят из белка тубулина, который может существовать в суперпозиции двух чуть разных форм. Пенроуз и Хамерофф утверждают, что микротрубочки обладают идеальными свойствами для поддержания этой суперпозиции и распространения ее на окружающие белки. Следовательно, когерентная суперпозиция поддерживается значительный период времени, делая возможным возникновение досознательных процессов. Объективная редукция суперпозиции происходит по достижении критического порога Пенроуза и включения сознания. Само собой, это происходит в мозге постоянно. Может, на самом деле нам и не нужен квантовый компьютер, ведь он находится у каждого из нас в голове!

Другой вариант – использовать так называемую квантовую коррекцию ошибок, чтобы компенсировать декогеренцию. В ее основе лежит избыточность, которая означает, что одна и та же информация распространяется на множество кубитов. Таким образом, если суперпозиция одного из кубитов оказывается каким-либо образом нарушенной, это не влияет на точность вычисления, поскольку та же информация закодирована и в других, не подвергшихся воздействию кубитах.

В настоящее время разработаны лишь квантовые компьютеры с несколькими кубитами. Вполне возможно, в ближайшем будущем ученым удастся построить квантовый компьютер, содержащий до сорока кубитов. Однако работающий квантовый компьютер требует запутанности тысяч кубитов и сдерживания декогеренции в течение достаточно длительного периода времени, необходимого для проведения полезных вычислений.

Квантовая телепортация

Миллионы фанатов по всему миру знают, что «транспортёр» на борту звездолета «Энтерпрайз» из «Звездного пути» представляет собой устройство, которое переносит команду корабля на различные планеты и обратно, не создавая их идентичные копии, а уничтожая их и воссоздавая неуточненным образом. Так как это всего лишь научная фантастика, в детали никто не вдаётся, однако не сомневаюсь, у истинных фанатов уже давно готово подходящее объяснение.

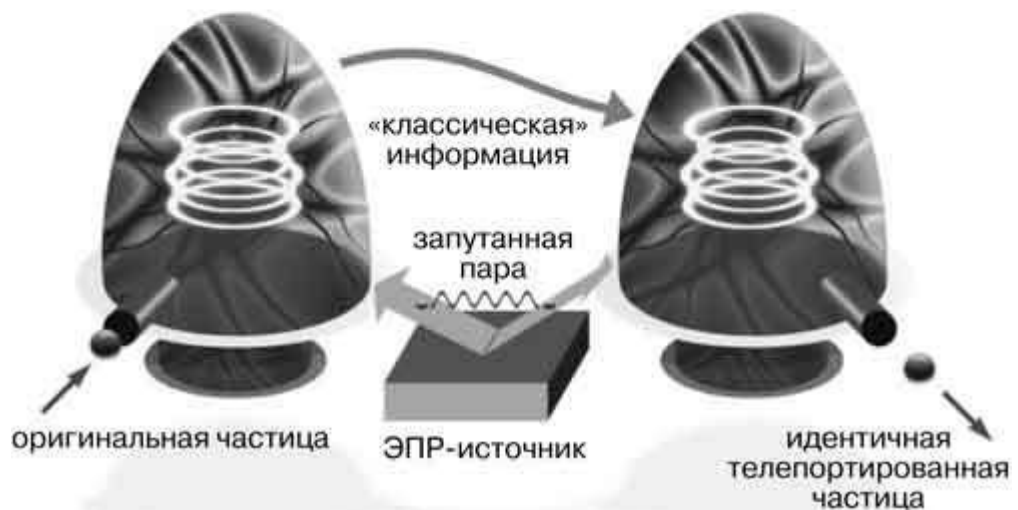
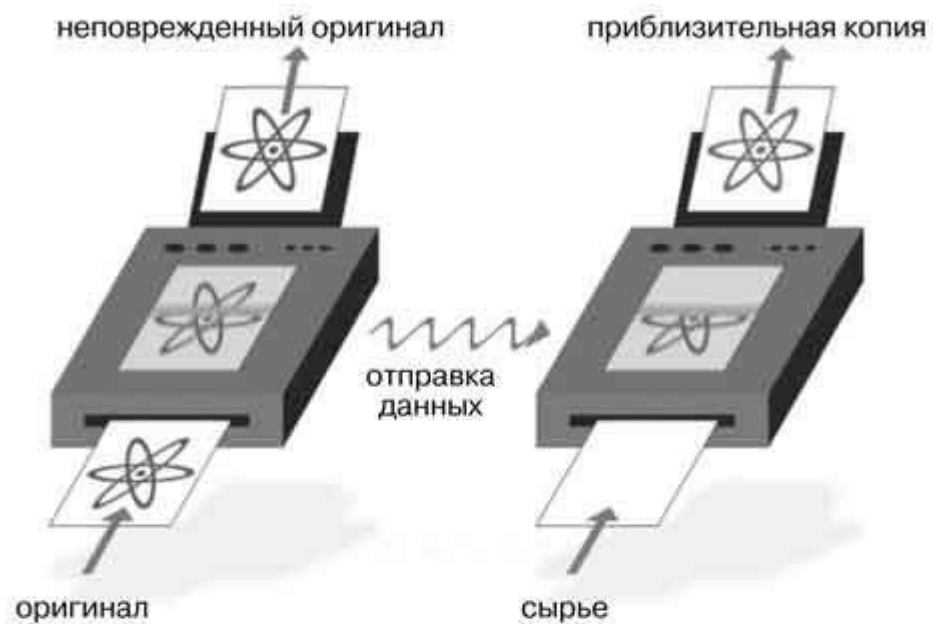
Основная идея телепортации заключается в сканировании объекта таким образом, чтобы переносилась чистая информация, используемая для воссоздания оригинала из подходящего сырья (верного типа атомов) в точке назначения. Такой процесс может происходить со скоростью света, в то время как физический перенос оригинальных атомов объекта занимает гораздо больше времени. Преимущество кажется сомнительным, пока в дело не вступают огромные расстояния, где без скорости света не обойтись.

Вам может показаться, что все это чепуха. Что ж, до 1993 года так и было. В тот год Чарльз Беннетт при участии группы коллег со всего мира доказал, что благодаря квантовой механике идеальная телепортация теоретически возможна, хотя пока что только на квантовом уровне. Прежде считалось, что телепортация квантовой системы исключается принципом неопределенности: мы не можем просканировать квантовую систему и собрать всю возможную информацию о ней, чтобы воссоздать ее в другом месте. Это, конечно, так, но при добавлении нового ингредиента эту проблему получается обойти, а этим ингредиентом выступает... запутанность. Снова.

Основная идея такова. Пусть частица, которую нужно телепортировать из точки А в точку Б, называется частицей x . В устройстве также содержится две подобные частицы, y и z . Две этих частицы запутаны и направлены в точки А и Б. Теперь в точке А находится оригинальная частица x , которую мы хотим телепортировать, а также частица y . Определенным способом измерив их вместе, мы получаем некоторую информацию об x . Остальная часть информации об x неизбежно теряется, так как принцип неопределенности не позволяет нам знать о ней все одновременно.

Однако факт измерения теперь привел к коллапсу запутанного состояния y и z и наделил частицу z , находящуюся в точке Б, информацией, которая связана с информацией, потерянной при измерении x вместе с y .

Информация, которую мы получили при сканировании x , теперь переносится в точку Б более традиционным способом и вместе с той информацией, которая уже находится в частице z , это дает нам всю информацию, необходимую нам в точке Б. Теперь мы можем зашифровать эту информацию в подобную x частицу и получим, по сути, точно воссозданную в точке Б частицу x .



Разница между квантовой телепортацией и обычной передачей факса.

Вверху: Когда изображение передается при помощи факса, оригинальный лист остается неповрежденным и создается лишь приблизительная копия.

Внизу: При квантовой телепортации теряется вся информация об оригинальной частице, но на другом конце создается ее идентичная копия.

Важно подчеркнуть, что квантовая телепортация не предполагает какой-то мгновенной нелокальной транспортировки, поскольку часть информации, необходимой для реконструкции квантовой системы в конечной точке, по-прежнему приходится переносить классическим образом (то есть не быстрее скорости света). Но красота этого метода заключается в том, что остаток информации, который теряется в процессе сканирования/измерения и который, как считалось, нам не позволит узнать принцип неопределенности, подлежит восстановлению в конечной точке благодаря нелокальной связи запутанных частиц.

Мне также следует подчеркнуть, что, получая всю информацию, мы не просто создаем копию оригинальной частицы. Мы изменяем ее квантовое состояние – посредством измерения – и воссоздаем ее снова. Нам не нужно физически переносить саму частицу, поскольку нам достаточно и квантовых атрибутов – нам достаточно информации. Две квантовых частицы в одинаковом квантовом состоянии поистине идентичны таким образом, который не имеет аналогов в классическом мире. Поэтому перенос всего информационного содержания квантовой частицы равносителен переносу самой частицы.

Само собой, в масштабах, необходимых для телепортации человека, все становится гораздо сложнее. Можете ли вы представить степень запутанности, которая нужна для переноса полного квантового состояния всех частиц в наших телах? Только подумайте, какую головную боль доставит нам декогеренция!

Никто не может предсказать, насколько быстро в будущем пойдет развитие в этом направлении. Некоторые физики полагают, что у нас не получится даже построить квантовый компьютер, в то время как другие уверены, что до его появления осталось от силы лет десять.

Как бы то ни было, в одном сомнений нет: мы еще не прощаемся с квантом.

Нас ждет светлое будущее. Нас ждет Квант.

Литература для дополнительного чтения

Существует множество научно-популярных книг о квантовой механике и связанных дисциплинах современной физики. Однако не все они одинаково хорошо разъясняют фундаментальные идеи непрофессионалам. Вот мой список тех, которым это удастся:

Jim Al-Khalili. *Black Holes, Wormholes and Time Travel* (Institute of Physics Publishing, 1999). Пожалуй, нет ничего удивительного в том, что я рекомендую именно эту книгу в качестве самого доступного из когда-либо написанных объяснения предложенных Эйнштейном теорий относительности и природы пространства и времени!

Julian Barbour. *The End of Time* (Phoenix, 1999). Сложная книга для непосвященных, но она того стоит. Барбур описывает радикально новую теорию природы времени. Он предлагает полностью отринуть концепцию времени, поскольку это лишь иллюзия. В процессе он объясняет теорию относительности и квантовую механику и показывает, как они согласуются друг с другом.

James T. Cushing. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony* (University of Chicago Press, 1994). Покойный Джим Кушинг предполагает, что, если бы Дэвид Бом предложил свою интерпретацию теории на заре квантовой механики, стандартной стала бы именно она, а не Копенгагенская. Эта книга заставляет задуматься, однако непрофессионалам она может показаться немного сложноватой.

Paul Davies and Julian Brown. *The Ghost in the Atom* (Cambridge University Press, 1986 and Canto, 1993). В первой главе приводится подробное объяснение квантовой теории, а остаток книги основан на серии интервью, которые Дэвис взял у нескольких ведущих квантовых физиков для BBC Radio. В результате в книге содержится несколько уникальных личных взглядов на квантовую механику. Читать ее очень интересно.

Brian Greene. *The Elegant Universe* (Vintage, 2000).^[80] Получившая широкое признание глубокая книга о поисках теории всего. Грин является одним из ведущих экспертов по теории струн; его книга весьма длинна, но она того стоит. Начиная с теории относительности и квантовой механики, Грин ведет читателя к десяти – и одиннадцатимерному пространству-времени.

John Gribbin. *Schrodinger's Kittens and the Search for Reality* (Weidenfeld & Nicolson, 1995). Гриббин – признанный мастер демистификации квантовой механики. Эта книга – продолжение его классического сочинения «В поисках кота Шрёдингера»^[81] (которое в 1980-х годах познакомило целое поколение с тайнами квантовой механики). Здесь Гриббин критикует стандартную копенгагенскую интерпретацию и вместо этого поддерживает другую трактовку – прочитайте книгу, чтобы узнать, какую именно!

Tony Hey and Patrick Walters. *The Quantum Universe* (Cambridge University Press, 1987). Прекрасно иллюстрированная книга о принципах квантовой механики и множестве ее применений в нашей повседневной жизни, от электроники до астрономии.

Michia Kaku. *Visions* (Oxford University Press, 1998). Необычайно вдохновляющая книга, в которой выдвигаются предположения, как наука XXI века изменит нашу жизнь, подарив нам генную инженерию, искусственный интеллект, квантовые компьютеры и многое другое.

David Lindley. *Where Does the Weirdness Go?* (BasicBooks, 1996). Эта научно-популярная книга прекрасно справляется с демистификацией идей квантовой механики. Ее автор приводит множество доводов в поддержку стандартной (копенгагенской) интерпретации квантовой механики).

Ray Mackintosh, Jim Al-Khalili, Bjorn Jonson and Teresa Pefia. *Nucleus: A Trip into The Heart of Matter* (Canopus, 2001). Будучи, пожалуй, единственным глянцевым альбомом о ядерной физике, эта книга описывает природу атомов и их ядер. Она рассказывает историю зарождения ядерной физики и объясняет, какую роль в ее развитии сыграла квантовая механика, а также демонстрирует огромное количество применений ядерной физики, от ядерной медицины до объяснения сияния солнца.

J.P. McEvoy and Oscar Zarate. *Introducing Quantum Theory* (Totem Books, USA, 1996 and Icon Books, UK, 1999). Чудесно иллюстрированный экскурс в историю квантовой теории, которая развивалась в работах ключевых ученых XX столетия. Иллюстратор Оскар Зарате стал лауреатом премии Уилла Айснера за лучший графический роман, но эта увлекательная и легкая книга не вымысел.

N. David Mermin. *Boojums All The Way Through* (Cambridge University Press, 1990). Сборник эссе ведущего квантового физика. Вероятно, лучшее, что написано о теории Белла и нелокальности в квантовой механике. Помимо этого, в книге собрано множество других удивительных историй, рассказанных прославленным популяризатором науки.

Roger Penrose. *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, 1989).^[82] Публикация этой книги сопровождалась шумихой; было даже организовано несколько международных конференций для обсуждения идей Пенроуза о природе сознания и искусственном интеллекте. В книге прекрасно объясняется квантовая механика и описывается возможный путь к теории квантовой гравитации.

Lee Smolin. *Three Roads to Quantum Gravity* (Weidenfeld & Nicolson, 2000). Взгляд практика на поиски теории квантовой гравитации.

Daniel F. Styer. *The Strange World of Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 2000). Дэн Стайер доступно объясняет значение эксперимента Эйнштейна – Подольского – Розена и теоремы Белла. Будучи сложнее других, эта книга, однако, стоит потраченного на нее времени, если вы готовы работать вдумчиво.

Если этого недостаточно, обратитесь к следующим книгам, многие из которых стали бестселлерами и уже признаны классикой: J.C. Polkinghorne (*The Quantum World*), Frank Close (*The Cosmic Onion*), George Gamow (*Mr Tompkins in Paperback*), R.P. Feynman (*QED: The*

Strange Theory of Light and Matter)^[83], Paul Davies (*Superforce*)^[84], David Deutsch (*The Fabric of Reality*)^[85].

Авторы иллюстраций

Дэвид Энджел

Тим Оливер.

Благодарности

При работе над этой книгой мне помогали многие мои друзья. Прежде всего я должен поблагодарить свою жену Джули и детей Дэвида и Кейт за их поддержку и понимание, которое они проявляли, когда последние пару лет я частенько вечерами и по выходным закрывался в комнате наедине с компьютером. Также я очень благодарен следующим людям, которые предоставили мне свои эссе, читали и комментировали рукопись, давали советы, вносили свои предложения и исправляли многочисленные ошибки. Перечислю их всех по алфавиту: Джереми Алам, Джули Аль-Халили, Назар Аль-Халили, Рейя Аль-Халили, Маркус Арндт, Майкл Берри, Рон Джонсон, Джейсон Дикон, Пол Дэвис, Крис Дьюдни, Фрэнк Клоуз, Рэй Макинтош, Джонджо Мак-Фадден, Абдель-Азиз Матани, Гарет Митчел, Грег Ноулз, Пол Стивенсон, Эндрю Стин, Ян Томпсон, Ричард Уилсон, Патрик Уолш, Греггерс Хансен, Дин Харман, Эд Хиндс, Антон Цайлингер и Дэвид Энджел. Все оставшиеся ошибки, конечно, на моей совести. Наконец, отдельное спасибо за помощь моему редактору Нику Читхему из издательства Weidenfeld & Nicolson.

Примечания

1

Для этого эксперимента прорези действительно должны быть очень узкими и расположенными близко друг к другу. Такие эксперименты действительно проводились в 1990-х годах: в них использовался экран из золотой фольги с прорезями шириной один микрометр (одну тысячную миллиметра).

2

Здесь я предполагаю, что детектор на 100 процентов эффективен и точно сработает, если атом пройдет через наблюдаемую прорезь.

3

Перевод Г. Кружкова. – *Примеч. пер.*

4

От thermo – «тепло» и dynamics – «движение». Эта область науки изучает, как тепло и другие формы энергии переносятся между телами.

5

По сути, макроскопическим можно назвать любой видимый нами объект, который достаточно велик, чтобы вести себя логичным «неквантовым» образом, в то время как микроскопическими называют объекты, размер которых достаточно мал (на уровне атомов и меньше), чтобы их поведение определялось квантовыми законами.

6

Наука о том, как вывести макроскопические свойства материи из микроскопической физики.

7

Это расхождение во мнениях отлично описывается в работе философа Томаса Куна *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity: 1894–1912* (Clarendon Press, Oxford, 1978) и в работе историка науки Хельге Крагха *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century* (Princeton University Press, 1999).

8

Впоследствии Планк считал крайне сложным принять предсказания квантовой теории и много лет пытался найти способ опровергнуть свои выводы.

9

Иногда показывается, как мощность зависит от частоты, а не от длины волны. Однако, поскольку эти свойства волн эквивалентны (короткие длины волн соответствуют высокой частоте, а длинные – низкой), оба типа графиков дают нам одинаковую информацию.

10

Термин «ультрафиолетовая катастрофа» даже не использовался до 1911 года.

11

Это несколько напоминает разницу между игрой на гитаре и на скрипке. На грифе гитары есть «лады» – металлические порожки. Когда струну пальцем прижимают к порожку, находящемуся ниже требуемого лада, звучащая нота становится результатом вибрации струны на отрезке от этого лада до нижнего порожка. По очереди зажимая идущие друг за другом лады, мы изменяем длину вибрирующей струны, в результате чего высота звучания изменяется на полтона. В связи с этим гитара, как и фортепиано, не может издавать звук, высота которого находится между двух полутонов (если играющий на ней не применяет специальных навыков). В то же время на скрипке ладов нет, так что ее струны могут издавать звук любой частоты, или тона, в зависимости от того, куда именно поставить палец.

12

Представьте их сгустками энергии, локализованными в пространстве. Однако, для того чтобы идея о «частицах» света прижилась, понадобилось некоторое время.

13

Само собой, в первой главе я называл его «фокусом», только чтобы добавить драматизма.

14

Вам придется подождать до седьмой главы, чтобы *увидеть* лучшее описание атомов. Впрочем, дальше мы узнаем, что «выглядят» атомы не так.

15

Они будут постепенно замедляться вследствие сопротивления воздуха и потери энергии из-за отдачи тепла и звука при столкновениях.

16

Другой вопрос, захотят ли подростки носить *футболку* с волновым уравнением на груди. Впрочем, в такой футболке, пожалуй, можно встретить разве что ботаника.

17

Математически это объясняется тем, что волновая функция представляет собой так называемую «сложную функцию», а следовательно, обладает как «действительной», так и «мнимой» частью, но вдаваться в подробности я не буду.

18

Заранее не угадаешь, когда у тебя в руках окажется волновая функция. Будет обидно не знать, что с ней делать.

19

Но здесь я не имею в виду, что она распространена в пространстве. Скорее она позволяет импульсу принимать одно из распространенного диапазона возможных значений.

20

В естественном состоянии они крайне нестабильны и существуют около одной десятой секунды.

21

Которую Зоммерфельд впоследствии расширил и обобщил, чтобы включить помимо простых кольцевых орбит Бора также эллиптические электронные орбиты.

22

Более раннюю статью «О квантовой механике» Борн и Йордан опубликовали тремя месяцами ранее без участия Гейзенберга.

23

Ради математиков я должен оговориться, что суперпозиция характерна для всех волн, которые представляют собой решения линейных уравнений. Если вам эти слова ни о чем не говорят, просто забудьте о них; я должен был защитить свой труд от педантичных коллег!

24

Пустой – то есть без других пловцов, а не без воды.

25

Надеюсь, вы не возражаете, что в качестве примера квантовых объектов я использую то атомы, то электроны. Было бы проще выбрать что-нибудь одно, однако в этом случае вам могло бы показаться, что вся квантовая странность связана лишь с этим объектом.

26

На практике проще использовать субатомные частицы или фотоны света (см. текст на страницах 76–78), но для нашего обсуждения подойдут и атомы.

27

Сегодня физики проводят эксперименты, используя атомные и даже молекулярные интерферометры.

28

Точно так же, если дважды бросить монетку, она не обязательно один раз упадет орлом вверх, а другой – решкой, потому что каждый из вариантов имеет вероятность 50–50.

29

Это не имеет ничего общего со знаменитым высказыванием Эйнштейна о том, что Бог не играет в кости. Не забывайте, он сказал это в ответ на утверждение, что квантовый мир управляется случайностью и неопределенностью. Я лишь по совпадению использовал в качестве примера игральные кости.

30

Конечно же, в реальности наш эксперимент бы очень затянулся, так как, чтобы две части волновой функции атома действительно оказались на расстоянии нескольких световых лет друг от друга, нам пришлось бы несколько лет ждать, пока атом пройдет сквозь столь гигантское устройство.

31

Вспомните описываемую в Главе 2 формулу де Бройля, которая связывает величину импульса частицы с длиной ее волны.

32

За более подробным, хотя и нетехническим, описанием теоремы Белла я рекомендую обратиться к книге Дэна Стайера *The Strange World of Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 2000). На самом деле существует и вторая теорема Белла (сегодня ее называют теоремой Белла – Козна – Шпекера), которую еще сложнее объяснить без применения формальной математики. Самые смелые читатели могут узнать о ней больше в обзорной статье Дэвида Мермина (*Reviews of Modern Physics*, Vol. 65, 1993, с. 803).

33

Не забывайте, Ньютон тоже полагал, что свет состоит из частиц.

34

Это особый детектор частиц, который щелкает всякий раз, когда в него попадает субатомная частица. Счетчики Гейгера используются для измерения уровня радиации.

35

Да, я понимаю, что такую уменьшенную дозу можно было использовать и в случае с котом, но я описывал оригинальную идею Шрёдингера.

36

Так как волновая функция состоит из двух частей, квадрат их суммы не равняется сумме их квадратов, а всегда получается больше на величину, которая называется условием интерференции. Чтобы увидеть это, обратите внимание, что, к примеру, $(2 + 3)^2 = 25$, но $2^2 + 3^2 = 13$.

37

Для иностранных читателей я должен пояснить, что «Лидс Юнайтед» – это лучший футбольный клуб Англии. В моем представлении, конечно.

38

Max Jammer. *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley & Sons, New York, 1974). P. 87.

39

Roland Omnes. *The Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, 1994). P. 81.

40

Werner Heisenberg. *Physics and Philosophy* (New York: Harper and Row, 1958). P. 129.

41

James T. Cushing. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony* (University of Chicago Press, 1994).

42

На самом деле Грета Герман указала на ошибку фон Неймана уже через три года после появления его теории, однако копенгагенская интерпретация к этому времени так прочно вошла в обиход, что никто, похоже, не обратил внимания на ее выкладки.

43

Самая известная была предложена в 1986 году тремя итальянскими физиками – Гирарди, Римини и Вебером – и называется ГРВ-подходом. Еще одну предложил Роджер Пенроуз, который предположил, что гравитация может справиться с задачей коллапса волновой функции.

44

Пожалуй, электрон все же не был полной неожиданностью.

45

Подтверждение, что рентгеновские лучи на самом деле представляют собой электромагнитное излучение, такое же, как свет, появилось лишь в 1912 году.

46

Не забывайте, что «квант» здесь означает самый маленький сгусток или единицу величины, которую в макромире мы считаем непрерывной, например энергии.

47

Форму электронной орбитали мы тоже можем узнать на основании волновой функции, в частности вероятностное облако показывает вероятностное распределение электрона вокруг атома.

48

От англ. *spin* – вращаться. – *Примеч. пер.*

49

Эта идея впервые появилась в классическом учебнике под названием «Гравитация» за авторством Мизнера, Торна и Уилера (WH Freeman & Co, 1973).

50

Импульс представляет собой произведение массы и скорости. Если импульс известен, а масса велика, то скорость должна быть низкой.

51

Другой формой этой силы является магнетизм.

52

Большой взрыв произошел примерно 4000000000000000000 (или 4×10^{17}) секунд назад, а протон может пересечь ядро 1000000000000000000000000 (или 10^{23}) раз за одну секунду. На одно пересечение ему необходима одна десятая часть временного интервала, называемого «зептосекундой» – одной тысячной одной миллиардной одной миллиардной секунды. Должен сказать, это великолепное и недооцененное слово. В будущем нам стоит использовать его чаще: «Вернусь через зептосекунду» или «Все случилось за зептосекунду».

53

Будучи нейтральными, нейтроны не ощущают электромагнитной силы и не замечают этот энергетический барьер. Однако сильное ядерное взаимодействие тем не менее удерживает их на месте в пределах ядра.

54

Ядра легчайших элементов, как правило, предпочитают равное количество протонов и нейтронов, в то время как в более тяжелых ядрах содержится больше нейтронов, чем протонов.

55

Каждую секунду вашей жизни сквозь каждый квадратный сантиметр вашей кожи проходят миллионы нейтрино из космоса, которые пронизывают ваше тело, «не касаясь» вас. Они ведут себя точно так же, проходя сквозь любой материал, так что нет ничего удивительного в том, что их оказалось так сложно поймать и изучить.

56

Яркое и понятное описание процесса создания элементов в космосе можно найти в книге *Nucleus: A Trip Into the Heart of Matter* Рэя Макинтоша и др. авторов (Canopus Publishing, 2001).

57

Представьте это в грубой форме как примерно сотню элементов (различающихся количеством протонов), большинство из которых имеет десятки различных изотопов (различающихся количеством нейтронов).

58

Предостережение о редукционизме: большинство природных явлений сложны, а многие их свойства проявляются лишь на макроуровне. Следовательно, изучение одной молекулы H_2O не дает нам никакого намека на то, почему вода «мокрая».

59

Разница в том, что в космосе вы не обладаете весом, так как на вас не действует гравитационная сила, но ваша масса при этом остается неизменной.

60

Впервые описанному в письме, которое Дирак отправил Бору в 1929 году.

61

Не путайте объединение квантовой механики с общей теорией относительности с достижением Дирака, которому в 1928 году удалось объединить квантовую механику со специальной теорией относительности. В сравнении это было лишь парой пустяков. В конце концов, в специальной теории относительности не задействованы силы.

62

Энтропия – это довольно странная величина, которая измеряет уровень беспорядка в физической системе. Например, перетасовка колоды карт повышает ее энтропию.

63

Она положительна только в том смысле, что там нет электрона, так что она положительна относительно окружающих ее электронов.

64

В отличие от света обычной лампочки, которая излучает некогерентный свет, так как волны выходят из нее не в фазе и даже характеризуются разной частотой.

65

Чтобы совершить захватывающую экскурсию по будущему микроэлектроники и телекоммуникаций, не говоря уже о других областях науки, которые в XXI веке ждет революция, рекомендую вам прочитать книгу Мичио Каку *Visions* (Oxford University Press, 1998).

66

В этом контексте под экзотическим ядром понимается такое ядро, для которого характерен сильный дисбаланс между числом входящих в него протонов и нейтронов. Из-за этого оно не только становится крайне нестабильным, но и часто получает странные новые свойства.

67

Я не горжусь таким отношением и с тех пор стал стараться лучше понять детали экспериментов.

68

Большой из двух циклотронов, K1200, ускоряет атомные ядра до одной трети скорости света (100000 километров в секунду). Каждое ядро преодолевает расстояние порядка трех километров, около 800 раз проходя по кругу. На выходе ядра попадают под действие магнитного поля мощностью до пяти Тесла. Чтобы дать контекст, скажу, что мощность магнитного поля Земли составляет одну десятитысячную Тесла, а типичного стержневого магнита – около одной десятой Тесла на полюсах. Учитывая, насколько маленьким и легким является отдельное атомное ядро, мы понимаем, что магнитное поле мощностью в несколько Тесла может оказывать на него довольно серьезное воздействие. Для сведения, самые мощные магнитные поля (до 60 Тесла) создаются при помощи специальных «пульсирующих» магнитов.

69

Абсолютный ноль равняется -273°C . Он считается нулевой точкой шкалы Кельвина (0 K). Так что мы можем сказать, что вода замерзает при температуре 273 K. Достичь абсолютного нуля мы не можем, но можем достичь температуры, отличающейся от него на малую долю градуса.

70

Это связано со спином фермионов, который всегда представляет собой нечетный множитель полуцелых значений, например $1/2$, $3/2$ и т. д. Два электрона со спином $1/2$ при вращении в одну сторону объединятся, в результате чего их общий спин будет равняться 1, а при вращении в противоположные стороны – 0. В любом случае квантовая система с целым (0 или 1) спином будет демонстрировать поведение, свойственное для бозонов.

71

В жидкой форме гелий имеет температуру менее 4 К ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$).

72

Некоторые атомы ведут себя как бозоны, другие – как фермионы. Все зависит от присущего им общего момента импульса. Когда два фермиона пытаются занять одно и то же состояние, их волновые функции разрушительным образом интерферируют, сводя вибрацию на нет, поэтому два фермиона никогда не могут находиться в одном состоянии.

73

Технически мы говорим, что происходит сдвиг протона по фазе. Понятие фазы связано с волнообразным поведением – как в терминах «в фазе» и «не в фазе» – и все же может применяться к отдельному фотону света, который описывается при помощи волновой функции, то есть величины, содержащей в себе информацию о фазе.

74

При абсолютном нуле атом должен быть стационарен (то есть обладать нулевым импульсом) и прикован к одному месту. Но тогда мы будем точно знать и его положение, и величину импульса, что нарушает принцип неопределенности. Следовательно, атомы всегда обладают небольшим запасом энергии, который называется нулевой энергией, и охладить их до абсолютного нуля невозможно.

75

Потому что он проверял состояние квантовой кошки.

76

C. A. Sackett et al. *Nature*, vol. 404 (16 марта 2000). P. 256.

77

Выберите одно из следующих определений: фемтосекунда равна 10^{-15} с, или одной миллиардной микросекунды, или одной миллионной одной миллиардной секунды, или... В общем, она в любом случае очень коротка.

78

В Северной Америке его продавали под брендом Timex, модель TS-1000. В Великобритании он стал первым компьютером ценой менее ста фунтов.

79

На практике измерение ориентации спина ядер влияет на волновые функции вращающихся на орбите электронов двух атомов, а следовательно, и на установленную между ними связь.

80

Брайан Грин. «Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории» (М., Либроком, 2017).

81

Джон Гриббин. «В поисках кота Шрёдингера. Квантовая физика и реальность» (М., Рипол Классик, 2016).

82

Роджер Пенроуз. «Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики» (М., Издательская группа URSS, 2015).

83

Ричард Фейнман. «КЭД. Странная теория света и вещества» (М., Полиграфиздат, 2012).

84

Пол Дэвис. «Суперсила» (М., Мир, 1989).

85

Дэвид Дойч. «*Структура* реальности. Наука параллельных вселенных» (М., Альпина нон-фикшн, 2017).