

Развитие квантовой механики

Лекция была организована Австралийским институтом физики в Школе физики при университете Нового Южного Уэльса (Кенсингтон, Сидней, Австралия) и прочитана 25 августа 1975 года

Я очень рад тому, что нахожусь здесь, в Сиднее, и имею возможность говорить с вами. А поговорить мне бы хотелось о том, как развивалась квантовая механика; почти вся ее история прошла на моих глазах. Квантовая механика развилась из классической механики Ньютона. Ньютон установил законы механики, на которых основана вся теория механических явлений и которые согласуются с результатами крупномасштабных наблюдений, если их несколько «подправить» в соответствии с теорией относительности Эйнштейна. Эти законы справедливы до тех пор, пока их применяют к большим телам. Для очень малых тел, вроде тех, с которыми мы встречаемся в мире атомов, законы Ньютона не выполняются.

Механика Ньютона, так называемая классическая механика, будет нашей отправной точкой. Классическую механику можно использовать для описания движения точечных электрических зарядов и заряженных частиц, если дополнить ее теорией Максвелла. Однако к атомам, как мы увидим, она неприменима.

Сейчас принята следующая картина строения атома: вокруг ядра, несущего положительный заряд, вращаются один или несколько электронов. Согласно механике Ньютона и Максвелла, примененной к электрическим зарядам, эти электроны должны были бы постепенно терять энергию на излучение и в конце концов упасть на ядро. Таким образом, атом был бы нестабильным. Однако известно, что атомы стабильны, так что сразу возникло противоречие, очень обеспокоившее всех.

Это противоречие блестяще разрешил Нильс Бор: необходимо принять, что атом может существовать в определенных стационарных состояниях, в которых он не излучает. Чтобы это было так, надо отойти от стандартных уравнений механики Ньютона и пренебречь силами, ответственными за излучение. Эти силы малы: они несущественны в первом приближении. Существенны лишь кулоновские силы, действующие между электрическими зарядами. Тогда, согласно Бору, надо ввести такое приближение в уравнение движения электронов в атоме, а затем предположить, что атом может существовать только в некоторых, так называемых стационарных, состояниях. Такие состояния определяются совершенно необычными для классической механики условиями; эта новая система условий, называемых квантовыми, содержит постоянную Планка (ее принято обозначать h), которую Планк ввел в свой закон излучения черного тела.

Бор построил модель атома, согласно которой атом находится в стационарных состояниях, подчиняющихся таким квантовым условиям. Атом может «перескакивать» из одного состояния в другое. Совершая скачок, он испускает (или поглощает) излучение, чтобы обеспечивалось сохранение энергии. Испускаемое или поглощаемое излучение представляет собой квант, обладающий определенной частотой, которая связана с энергией.

Представления Бора коренным образом отличались от ньютоновых: предположение о стационарных состояниях, удовлетворяющих определенным условиям, было очень непривычным. Однако идеи Бора оказались чрезвычайно плодотворными для объяснения спектра атома водорода и других простейших атомов, в которых существенную роль играет только один электрон. Успех теории Бора был так велик, что она вскоре получила всеобщее признание.

Помню свое удивление, когда я впервые познакомился с теорией Бора. До появления этой теории мир атома был окутан сплошной тайной. Студентом, в Бристоне, я ничего не знал о теории Бора и услышал о ней уже будучи аспирантом в Кембридже; и тогда передо мной раскрылся новый, совершенно удивительный мир. Удивительным было то, что при определенных условиях законы Ньютона оказались пригодными для описания движения электронов в атоме: для этого нужно, во-первых, пренебречь действующими на электроны силами, связанными с излучением; во-вторых, ввести в рассмотрение квантовые условия. Помню, какое огромное впечатление произвела на меня теория Бора. Я считаю, что появление идей Бора было самым грандиозным шагом в истории развития квантовой механики. Самое неожиданное, самое удивительное заключалось в том, что столь радикальное отступление от законов Ньютона дало такие замечательные плоды.

Разные физики продолжали развивать теорию Бора, но достижения оказались весьма скромными. Успех сопутствовал тем, кто занимался атомной системой, в которой существенную роль играл только один электрон. Если же электронов было два или больше двух, как в атоме гелия или более сложных атомах, то для таких систем не удавалось с помощью квантовых условий найти стационарные состояния. Производились разные вычисления, основанные на искусственных предположениях, но все они были безуспешны. Такова была ситуация, когда я приступил к исследованиям в области теории атома. Я столкнулся с задачей, над которой в то время работали многие физики: «Как распространить идею боровских орбит на более сложные атомы?»

В этом направлении сильно продвинулся Гейзенберг в 1925 году. Он сделал очень смелый шаг. У него возникла мысль сосредоточиться на величинах, тесно связанных с наблюдаемыми величинами. Однако все наблюдаемое имеет весьма отдаленное отношение к боровским орбитам, поэтому Гейзенберг заявил, что отдельные боровские орбиты не очень существенны. Все явления, наблюдаемые нами или же тесно связанные с наблюдаемыми, можно объяснить с

помощью двух боровских орбит, а не одной: *двух* вместо *одной*. Что же из этого вытекает?

Представим себе, что все однотипные величины (одной природы) связаны с двумя орбитами и нам нужно придумать, как их записать. Набор величин, каждая из которых связана с двумя элементами, естественно представить в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} \times & \times & \times & \times & \dots \\ \times & \times & \times & \times & \dots \\ \times & \times & \times & \times & \dots \\ \times & \times & \times & \times & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

При такой форме записи — из строк и столбцов — столбцам ставится в соответствие одно из состояний, а строкам другое. Подобный набор величин математики называют матрицей.

Гейзенберг предложил использовать такой набор величин и считать, что он отвечает одной из динамических переменных теории Ньютона. К динамическим переменным относятся, конечно, координаты частиц, их скорости и импульсы. Согласно Гейзенбергу, каждую из таких величин надо заменить матрицей. Гейзенберг исходил из того, что теория должна быть основана на наблюдаемых величинах и что наблюдаемыми величинами являются элементы матрицы, с которыми связаны две орбиты.

Матрицы можно обычным образом складывать и умножать, из них можно построить алгебру, однако при манипуляциях с ними возникает важное новое свойство: если при перемножении двух матриц a и b получается ab , то обычно этот результат отличается от того, который дает умножение b на a . Для умножения матриц существуют определенные правила, обойти которые невозможно и из-за которых ab не равно ba . Если мы хотим обращаться с динамическими переменными как с матрицами, то это означает, что наши динамические переменные образуют алгебру, в которой $ab \neq ba$. Такую алгебру называют некоммутативной.

Гейзенберг очень встревожился, обнаружив, что введенные им матрицы не подчиняются закону коммутативности умножения: ведь из-за этого могла рухнуть вся теория. (С незапамятных времен физики использовали динамические переменные, которые всегда образуют обычную алгебру: a , умноженное на b , равно b , умноженному на a . Было совершенно непостижимо, чтобы динамические переменные не обладали таким свойством.) Несмотря на недоумение, которое вызвал у Гейзенберга этот факт, он стал в его теории основным пунктом, а потом оказался и наиболее важным. Действительно, самое значительное в механике Гейзенберга — это то, что динамические переменные являются элементами алгебры, в которой умножение некоммутативно.

Затем исходная идея Гейзенберга получила дальнейшее развитие, и я, будучи аспирантом, смог принять в этом участие. Как видите, мне посчастливилось родиться в такое время, когда все могло произойти именно так, как произошло.

Перед нами стояла задача так видоизменить уравнения Ньютона, чтобы они удовлетворяли алгебре, в которой ab не равно ba . На первый взгляд это казалось довольно сложным. Однако задача сильно упростилась благодаря результатам Гамильтона, которые он получил лет за сто до начала нашей работы. Гамильтон исследовал уравнения Ньютона и нашел для них другой способ записи. Тогда уже существовал общий способ записи этих уравнений, введенный Лагранжем. Гамильтон же придумал другой способ их записи, который сейчас называют гамильтоновой формой уравнений. Записать уравнения Ньютона по-новому Гамильтона побудили лишь соображения математической красоты. Он мог рассуждать, наверное, так: «Записанные в таком виде уравнения очень красивы, но их совершенно не обязательно так записывать. Продолжайте, если хотите, пользоваться той формой записи, которую в самом начале ввел Ньютон».

Однако Гамильтон был, по-видимому, наделен каким-то удивительным даром проникать в самую суть — удивительнейшим даром из тех, которыми когда-либо обладал математик. Он нашел для уравнений механики такую форму записи, значение которой суждено было понять лишь спустя столетие, через много лет после его смерти.

Значение гамильтоновой формы записи уравнений Ньютона состоит в том, что ее очень просто обобщить, чтобы включить некоммутативность. Для записи гамильтоновых уравнений можно использовать выражение, которое называют скобкой Пуассона и обычно записывают следующим образом:

$$\{a, b\}.$$

(Я не буду приводить определения этого выражения. Скажу лишь, что оно обязательно появляется в гамильтоновых уравнениях и имеет фундаментальное значение.) Оказывается, что скобка Пуассона соответствует (в очень сильной степени аналогична) выражению

$$(ab - ba)/i\hbar \quad (\hbar = h/2\pi). \quad (1)$$

Заменяя в соответствии с этой формулой скобку Пуассона в гамильтоновой форме уравнений коммутатором $ab - ba$, мы сразу перейдем от уравнений классической механики в гамильтоновой форме к новым уравнениям, для которых умножение некоммутативно и которые можно использовать в гейзенберговой картине квантовой механики.

В то время можно было участвовать в интересной игре: различные модели динамических систем, к которым мы привыкли в теории Ньютона, приводить по общей формуле

$$\{a, b\} \rightarrow (ab - ba)/i\hbar \quad (2)$$

к новой механике Гейзенберга. Я не случайно употребил слово «игра», оно точно передает то, что мы делали, — мы были увлечены интересной игрой. Всякий раз, решив одну небольшую задачу, автор мог писать об этом статью. В те времена даже «второсортный» физик мог с легкостью сделать первоклассную работу. Теперь, увы,

другие времена: сейчас первоклассному физику очень трудно сделать второсортную работу. Тогда мы умели сравнительно просто переходить от гамильтоновой формы записи уравнений Ньютона к уравнениям механики Гейзенберга. В результате в нашем распоряжении оказывались уравнения новой квантовой механики.

Мы получили уравнения, в которые входили некоммутирующие величины, но при этом не могли их интерпретировать. Таким образом, в физической теории сложилась совершенно удивительная ситуация. (Обычно в любой физической теории исследователь сначала понимает именно смысл своих уравнений и только потом их записывает. Здесь же, наоборот, мы получили уравнения до того, как научились их применять.)

Эти уравнения не сразу получили интерпретацию. На простых примерах высказывались разные предположения. Элементы, расположенные вдоль главной диагонали диагональной матрицы, отвечающей полной энергии, можно было рассматривать как энергии состояний в квантовой теории. После этого можно было постепенно отрабатывать более общие методы интерпретации.

Надо подчеркнуть, что нам было известно общее уравнение движения для любой динамической переменной. Согласно Гамильтону, любая динамическая переменная u должна изменяться во времени по закону

$$du/dt = [u, H], \quad (3)$$

где H — полная энергия в теории Гамильтона. Этому соответствует квантовое уравнение

$$du/dt = (uH - Hu)/i\hbar. \quad (4)$$

Оно представляет собой общее уравнение движения для динамической переменной в механике Гейзенберга.

Итак, мы столкнулись с необходимостью дать общую интерпретацию новых уравнений. Этому очень помогла одна из работ Шрёдингера. Он (независимо от Гейзенберга) создал собственную теорию — такую альтернативную схему квантовой механики, которая, на первый взгляд, не имела ничего общего с гейзенберговской теорией. Однако через несколько месяцев (Шрёдингер начал работу немного позже, чем Гейзенберг) оказалось, что теории Шрёдингера и Гейзенберга на самом деле эквивалентны друг другу, несмотря на то, что их исходные положения кажутся совершенно разными.

Теория Шрёдингера была основана на более ранней работе де Бройля, в которой показано, как можно ввести волны, связанные с частицами. Де Бройль использовал волновые функции, которые обычно обозначаются греческой буквой ψ . Для одной частицы ψ зависит от трех координат этой частицы (назовем их x_1, x_2, x_3) и времени:

$$\psi(x_1, x_2, x_3, t).$$

Де Бройль написал уравнение для волн, которые описывались волновой функцией ψ . Согласно уравнению де Бройля плоские волны,

движущиеся в определенном направлении с определенной частотой, соответствуют частице с определенными значениями импульса и энергии. Это релятивистское соответствие математически безупречно.

На мысль о том, что волны и частицы связаны между собой, де Бройля натолкнули соображения математической красоты. Теория де Бройля была приложима только к частицам, на которые не действуют никакие силы, а Шрёдингер сумел обобщить теорию так, чтобы с ее помощью можно было описать движение электрона в электромагнитном поле, когда на него действуют электрические и магнитные силы.

В теории Шрёдингера фигурируют операторы, которые действуют на ψ :

$$-i\hbar \frac{\partial}{\partial x_r} = p_r, \quad (5)$$

где r принимает значения 1, 2, 3. Каждый из этих операторов соответствует одному из операторов импульса. Если мы используем такие операторы и координаты x , то это означает, что мы имеем дело с некоммутирующими величинами, аналогичными некоммутирующим величинам в теории Гейзенберга. Значит, можно установить связь между теорией Шрёдингера, в которой применяются волновые функции и действующие на них операторы, и теорией Гейзенберга.

В первоначальном, гейзенберговом, варианте теории функции ψ не было: она возникла в квантовой механике после появления работы Шрёдингера. Потом выяснилось, что волновая функция ψ соответствует одному из состояний, например, одному из стационарных состояний теории Бора. Операторы, переводящие одну волновую функцию в другую, связаны, таким образом, с двумя состояниями. Так было установлено, что теории Шрёдингера и Гейзенберга эквивалентны.

Общий метод интерпретации новой механики, появившийся через два или три года после уравнений, заключался в следующем: квадрат модуля волновой функции $|\psi|^2$ предполагался равным вероятности того, что частица находится в данной точке в определенный момент времени.

Я употребил здесь слово «вероятность». Это означает, что при интерпретации квантовой механики используется понятие вероятности. Такая интерпретация позволяет вычислить вероятность определенного события, в нашем случае — вероятность того, что электрон находится в определенной точке в определенный момент времени. В механике Ньютона, т. е. в классической механике, мы не просто вычисляем вероятности — мы точно вычисляем, какие именно события должны произойти. Новая механика, квантовая, лишена определенности, которая характерна для механики Ньютона. Отсутствие определенности является чрезвычайно серьезным препятствием на пути к пониманию новой механики. Это то, с чем очень трудно примириться.

Конечно, результаты экспериментов с атомами всегда носят вероятностный характер; мы умеем вычислять вероятности по прави-

лам новой механики и сравнивать теоретические и экспериментальные результаты. Оказывается, что данные теории и наблюдения согласуются между собой. Если встать на эту точку зрения, то совершенно достаточно знать вероятность события. Тем не менее человек не чувствует себя удовлетворенным, если теория дает только вероятности. Все это стало причиной очень серьезных разногласий.

Одни физики, во главе с Эйнштейном, считали, что по своей сути физика должна быть причинной, а не просто давать вероятности того или иного события. Бор же принял вероятностную интерпретацию, которая согласовывалась с его философскими взглядами. Это привело к значительным разногласиям между школами Бора и Эйнштейна, к разногласиям, сохранившимся на протяжении всей жизни Эйнштейна. И Бор, и Эйнштейн были выдающимися физиками. Так кто же из двоих был прав?

Кажется, что, согласно общепринятым идеям атомной теории, прав Бор. Вероятностная интерпретация, основанная на волновой функции Шрёдингера, — лучшее, что удалось придумать. Делалось много попыток усовершенствовать теорию, чтобы получать с ее помощью не только вероятности. Однако все эти попытки провалились! В соответствии с современной квантовой механикой вероятностная интерпретация, которую отстаивал Бор, правильна. Но у Эйнштейна был все-таки один козырь. По его словам, добрый Бог не играет в кости. Эйнштейн верил в то, что физика должна быть причинной по своему характеру.

Я не исключаю возможности, что в конце концов может оказаться правильной точка зрения Эйнштейна, потому что современный этап развития квантовой механики нельзя рассматривать как окончательный. В этой теории существует немало нерешенных проблем, о которых я расскажу позже, в связи с современной квантовой механикой. Современная квантовая механика — величайшее достижение, но вряд ли она будет существовать вечно. Мне кажется весьма вероятным, что когда-нибудь в будущем появится улучшенная квантовая механика, в которой будет содержаться возврат к причинности и которая оправдывает точку зрения Эйнштейна. Но такой возврат к причинности может стать возможным лишь ценой отказа от какой-нибудь другой фундаментальной идеи, которую сейчас мы безоговорочно принимаем. Если мы собираемся возродить причинность, то нам придется заплатить за это, и сейчас мы можем лишь гадать, какая идея должна быть принесена в жертву.

Таковы основные положения, связанные с фундаментальными уравнениями новой механики и с их интерпретацией. А сейчас мне бы хотелось обсудить одну частную задачу, которой я много занимался, а именно задачу о том, как согласовать эти уравнения с теорией Эйнштейна. Уравнения Ньютона, с которых я начал, справедливы лишь для частиц, движущихся с небольшими скоростями, не сравнимыми со скоростью света. Как только вы займетесь быстро движущимися частицами, вам придется перейти к новой механике — механике специальной теории относительности Эйнштейна. Однако эта новая механика все еще не выходит за рамки теории Ньютона,

а ее уравнения можно записать в гамильтоновой форме. Тут возникают некие специфические задачи, исследование которых в конце концов приводит к концепции антиматерии. Мне бы хотелось обсудить основные моменты этого исследования.

Нам придется написать несколько уравнений. Энергия частицы в теории Ньютона

$$E = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2m} p^2,$$

где p — импульс частицы. Если скорость v велика, т. е. если v становится сравнимой со скоростью света, то, согласно теории Эйнштейна, эту формулу надо заменить другой:

$$E = c \sqrt{m^2 c^2 + p^2}. \quad (6)$$

Эйнштейновская формула очень сильно отличается от формулы Ньютона. Различие проистекает прежде всего из того факта, что если частица вообще не движется, то по теории Ньютона ее энергия равна нулю, а по теории Эйнштейна она отлична от нуля и равна mc^2 .

Таким образом, по теории Эйнштейна частица обладает дополнительной, не зависящей от ее скорости, энергией, которая «заперта» внутри частицы. Для малых значений импульса p формула Эйнштейна имеет вид

$$E = mc^2 + \frac{1}{2m} p^2 + \dots$$

В нее входят еще члены, содержащие более высокие степени p . Следовательно, для частицы, движущейся не очень быстро, существование дополнительной энергии согласуется с теорией Ньютона.

Существует и другое различие между эйнштейновской формулой для энергии и формулой Ньютона: в выражение (6) для энергии входит квадратный корень. Вы знаете из математики, что перед квадратным корнем можно поставить знак плюс или минус. Получается, что по формуле Эйнштейна энергия может принимать как отрицательные, так и положительные значения. Графически энергии приняты изображать горизонтальными линиями, отвечающими разным энергетическим уровням. Тогда по формуле Эйнштейна значение энергетического уровня может быть равно или больше mc^2 , поднимаясь так до бесконечности. Группа таких энергетических уровней изображена на рис. 1. Есть и другая группа уровней, которые начинаются со значения $-mc^2$ и продолжают вниз до минус бесконечности, как показано на рис. 2. Все эти энергетические уровни, разрешенные формулой Эйнштейна, приведены на рис. 3.

На практике вы всегда наблюдаете лишь частицы с положительной энергией. Таким образом, часть значений энергии, которые разрешены по эйнштейновской формуле (6), не наблюдается в эксперименте. Однако вначале это не очень беспокоило физиков. Они решили: «Давайте не обращать внимания на отрицательные энергии и рассматривать только положительные». Это казалось вполне допу-

стимым: если частица находится сначала в состоянии с положительной энергией, то энергия всегда остается положительной, и отрицательные энергии не играют в теории никакой роли.

Формула (6) справедлива для частицы в отсутствие внешнего поля. Ее можно без особых изменений обобщить на случай какой-нибудь заряженной частицы, например электрона, находящейся в электромагнитном поле; можно найти все энергетические уровни при более общих условиях. Кроме того, в нашем распоряжении есть уравнения Лоренца — классические уравнения, которые описывают движение частицы в механике Эйнштейна, когда на частицу действуют электрическое и магнитное поля. Так вот, эти уравнения Лоренца применяли к электрону, обладающему положительной энергией.

Уравнениями Лоренца можно было бы воспользоваться и для электрона с отрицательной энергией. Насколько мне известно, этими вычислениями никто не занимался: дело в том, что отрицательными энергиями просто не интересовались. Если бы кто-нибудь произвел все эти вычисления и начал с помощью уравнений Лоренца выяснять, как должен был бы двигаться электрон в случае, если бы он начал свое движение в состоянии с отрицательной энергией, то оказалось бы, что электрон будет всегда оставаться в состоянии с отрицательной энергией, двигаясь так, как если бы его энергия и заряд были положительными (обычный электрон обладает отрицательным зарядом). Создается впечатление, будто в этих состояниях с отрицательными энергиями и заряд, и энергия меняют свой знак на противоположный. Таково, согласно классической механике, положение с обобщением эйнштейновской теории на случай больших скоростей.

Ситуация меняется при переходе к квантовой механике, потому что в квантовой механике появляются динамические переменные, значения которых изменяются скачкообразно. И если вначале энергия положительна, то в квантовой теории она не обязана оставаться положительной, а может скачком стать отрицательной. Закрывать глаза на отрицательные уровни энергии можно было до тех пор,

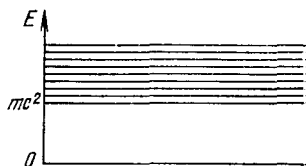


Рис. 1. Уровни с положительными значениями энергии, вычисленные по формуле Эйнштейна

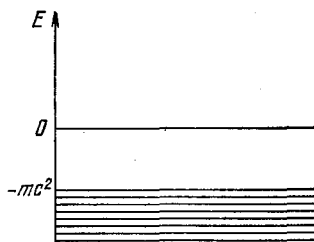


Рис. 2. Уровни с отрицательными значениями энергии

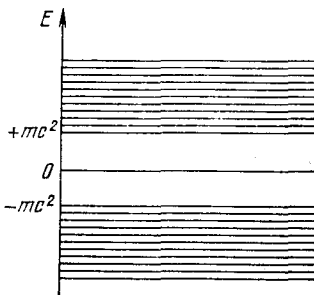


Рис. 3. Полный набор энергетических уровней, разрешенных по формуле Эйнштейна

пока мы имели дело с классической теорией. В квантовой теории так поступать нельзя.

Надо сказать, что возможность существования отрицательных энергий имеет очень глубокий смысл. Тем не менее никто ими особенно не интересовался, потому что люди бились над более серьезными проблемами, пытаясь понять и интерпретировать идеи квантовой механики. Именно эти проблемы занимали физиков в то время.

Однако с необходимостью создания релятивистской квантовой механики пришлось все же примириться. Используя квантовую механику в волновом формализме де Бройля или Шрёдингера и имея волновую функцию ψ , можно было написать релятивистское волновое уравнение

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right) \psi = 0. \quad (7)$$

Согласно де Бройлю, это уравнение, которому удовлетворяет ψ , соответствует свободной частице. Его можно распространить на случай, когда присутствует электрическое или магнитное поле, и показать, как будет изменяться со временем волновая функция. Мне не хочется выписывать это более сложное уравнение. Скажу лишь, что оно представляет собой уравнение (7) с некоторыми дополнительными членами, характеризующими свойства поля.

Итак, существовало волновое уравнение для частицы (электрона) в электрическом или магнитном поле, и с его помощью волновой функции была дана релятивистская интерпретация. Но оказалось, что эта релятивистская интерпретация не согласуется с общей теорией Шрёдингера. Причина расхождения состоит в том, что в уравнение (7) входит квадрат оператора дифференцирования по времени $\partial^2/\partial t^2$, а уравнение общей теории Шрёдингера

$$i\hbar \partial\psi/\partial t = H\psi \quad (8)$$

линейно по $\partial/\partial t$.

Значит, используя уравнение (7) и записывая в релятивистском виде уравнение для вероятности, мы бы обнаружили, что вероятность не всегда положительна. Если же пользоваться уравнением (8) и записывать вероятность как $|\psi|^2$, то ее знак будет всегда положительным, как это и должно быть физически.

Таким образом, при согласовании квантовой механики с теорией относительности возникли трудности. Я был очень озабочен ими в то время, но других физиков по какой-то непонятной мне причине эти проблемы совершенно не волновали.

Наверное, изящество и мощь формализма, основанного на гейзенберговом уравнении движения (4) и на соответствующем уравнении Шрёдингера (8), произвели на меня огромное впечатление; я ощутил, что нужно держаться за этот формализм и не переходить к другому уравнению, где вместо $\partial/\partial t$ фигурировало бы $\partial^2/\partial t^2$. Помню один случай на Сольвеевском конгрессе в 1927 году. В перерыве перед одной из лекций ко мне подошел Бор и спросил: «Над чем Вы сейчас работаете?» Я сказал ему, что пытаюсь найти удовлет-

ворительную квантовую теорию электрона. Бор ответил, что эта задача уже решена Клейном (решение Клейна включало в себя соотношение (7)). Я попробовал объяснить Бору, что меня не удовлетворяет решение Клейна, и хотел привести аргументы, но мне не удалось этого сделать, потому что началась лекция и наша дискуссия оборвалась. Но этот разговор открыл мне глаза на тот факт, что многим физикам нравится теория, в которой содержится радикальное отступление от некоторых основных законов квантовой механики, и они в отличие от меня не ощущают необходимости придерживаться этих законов.

Несколько месяцев мучился я над этой задачей и наконец нашел решение. Я получил другое волновое уравнение

$$\left\{ i\hbar \left(\frac{\partial}{c\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \alpha_3 \frac{\partial}{\partial x_3} \right) + \alpha_m mc \right\} \psi = 0, \quad (9)$$

в которое, вместо однокомпонентной функции ψ из уравнения (8) входила теперь функция ψ , имеющая четыре компоненты. Буквой α обозначены матрицы, которые действуют на эти четыре компоненты. Можно показать, что уравнение (9) является релятивистским и что вместо двукратного дифференцирования $\partial^2/\partial t^2$ в него входит однократное $\partial/\partial t$. Следовательно, оно согласуется с основными законами квантовой теории. Это-то я и предложил в качестве уравнения, описывающего движение электрона.

Я обнаружил из этого уравнения, что электрон обладает спином, равным $1/2$, и магнитным моментом и что значения спина и магнитного момента согласуются с экспериментальными. Полученный результат был совершенно неожиданным, так как он означал, что простейшее решение задачи построения релятивистской квантовой теории частицы соответствует частице со спином. Я считал, что простейшее решение получится для частицы без спина, а уже затем нужно будет ввести спин. Оказалось же, что в простейшее решение входит спин.

Уравнение (9) прекрасно «работало» в самых различных направлениях теории, но проблема отрицательной энергии оставалась нерешенной. В новой теории наряду с положительными энергиями разрешены и отрицательные, и, поскольку остальные трудности были устранены, проблема отрицательной энергии стала главной.

Оказалось, что эту проблему можно решить, если использовать то свойство электронов, что никакие два (или более) из них не могут находиться в одном и том же состоянии. Это свойство является следствием законов квантовой механики, возникающим при наложении на волновую функцию необходимых условий симметрии. Первым его предложил Паули, для того чтобы объяснить структуру атомов в периодической системе элементов. Если ни в каком состоянии не может находиться больше одного электрона, то в атоме существуют разные электронные оболочки. Оболочки заполняются постепенно от внутренней к внешней, и так постепенным заполнением оболочек строится периодическая система элементов.

В квантовой механике нельзя исключить переходы из состояний с положительной энергией в состояния с отрицательной энергией, а это означает, что невозможно исключить из теории отрицательные состояния. А раз так, мы обязаны отыскать способ их физической интерпретации. Разумную интерпретацию дает новое представление о вакууме. Раньше вакуум представляли себе как совершенно пустую область пространства, т. е. область, в которой совсем ничего нет. Сейчас мы вынуждены принять другую картину. Можно сказать, что вакуум есть область в пространстве с минимально возможной энергией. Для того чтобы достичь низшей энергии, необходимо заполнить все состояния с отрицательной энергией. Чем большим числом электронов заняты состояния с отрицательной энергией, тем меньше полная энергия, потому что каждый электрон в состоянии с отрицательной энергией уменьшает полную энергию. Таким образом, примем новую картину вакуума, в котором заняты все состояния с отрицательной энергией и свободны все состояния с положительной энергией.

Из состояния вакуума можно выйти двумя способами: первый заключается в том, чтобы одно из состояний с положительной энергией заполнить электроном; второй способ — в том, чтобы создать «дырку» в распределении состояний с положительной энергией. Второй способ заставляет нас обратить внимание на понятие дырки. Вы можете поинтересоваться, как такая дырка будет двигаться в присутствии электромагнитного поля. Оказывается, что она движется, грубо говоря, так же, как двигался бы заполняющий ее электрон. Все сказанное согласуется с квантовой модификацией классического уравнения Лоренца для частицы с отрицательной энергией. А как я уже сказал, частица с отрицательной энергией в соответствии с уравнением Лоренца будет вести себя так, как будто ее энергия и заряд положительны. Поэтому дырка движется так, как будто она обладает положительной энергией и положительным зарядом, а не обычным отрицательным зарядом, который несет электрон; дырки возникают как новый сорт частиц, заряженных положительно.

Какова масса новых частиц? Когда я впервые об этом подумал, мне пришло в голову, что из соображений симметрии масса должна быть такой же, как у электрона. Но я не осмелился выдвинуть эту идею; мне казалось, что если бы новая частица существовала (с массой, равной массе электрона, но с противоположным по знаку зарядом), то, конечно, ее бы уже давно открыли экспериментаторы. В то время известными частицами были только отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный протон, а все атомные ядра считались составными системами. Вот почему я высказал предположение, что эти дырки соответствуют положительно заряженным протонам, и оставил открытым вопрос о том, почему их масса должна так сильно отличаться от массы электрона.

Конечно, это было большой ошибкой: мне просто не хватило твердости. Прежде всего следовало сказать, что дырка должна иметь ту же массу, что и электрон. Это предположение было сдела-

но другими вскоре после опубликования моей статьи. По-моему, Вейль первым высказал вполне четкое утверждение о том, что в силу требований математической симметрии дырки должны быть частицами с массой, равной массе электрона. (Вейль был математиком, и его интересовали только вопросы, связанные с математической симметрией. Поэтому он совершенно не волновался по поводу того, что физики никогда не видели такую частицу.) Похоже, что идея была правильной: дырки — это новые частицы, которые сейчас называют позитронами, обладающие такой же, как у электрона, массой и противоположным по знаку зарядом. Тогда возникает вопрос: «Почему же их не видели экспериментаторы?» Я думаю, что единственный правильный ответ на этот вопрос состоит в том, что у экспериментаторов сложилось предубеждение против новых частиц.

Считалось, что в Природе существуют всего две основные частицы: электрон и протон. Их нужно было всего две, потому что есть всего два вида электрического заряда: отрицательный и положительный. Если есть одна частица для отрицательного заряда, одна для положительного..., то вроде бы все в порядке, двух частиц достаточно. Никакие другие частицы не нужны. Эта идея тогда господствовала.

Позитроны не наблюдались потому, что люди закрывали глаза на все свидетельства в пользу их существования. Треки заряженных частиц можно наблюдать в камере Вильсона. В присутствии магнитного поля трек искривляется. Положительно заряженная частица, двигаясь в каком-то направлении, дает совершенно такой же трек, как отрицательно заряженная частица, движущаяся в противоположном направлении. Можно предположить, что все треки, которые наблюдатель считает электронными, отвечают отрицательно заряженным электронам и что все электроны перемещаются в направлении, соответствующем направлению движения отрицательного заряда. Некоторые экспериментаторы замечали, что довольно часто частицы влетают в радиоактивный источник. Опубликованы даже одна или две фотографии треков частиц, которые, если следовать принятой тогда интерпретации, влетали в источник. Никому даже не пришло в голову «набрать статистику». Если бы кто-нибудь занялся этим, то он бы обнаружил, что частиц, движущихся в сторону источника, многовато для того, чтобы такое объяснение было возможным. И все же физики упорно не хотели признавать существование новой частицы.

Сейчас ситуация совершенно изменилась. Всем очень хочется «постулировать» новую частицу при малейшем экспериментальном или теоретическом намеке на ее существование. А тогда, чтобы установить существование позитрона, понадобилось несколько лет. У Блэкетта были довольно убедительные свидетельства в пользу существования позитрона, и, будучи в Кембридже, он мне о них рассказал. Но он сомневался, не рано ли публично высказывать столь революционную идею, ему хотелось иметь подтверждение своих экспериментов. Эта задержка привела к тому, что автором

открытия оказался Андерсон. У Андерсона был всего один снимок такого трека (он показан на рис. 4), проходящего сквозь свинцовую пластинку. По одну сторону пластинки трек был искривлен сильнее, чем по другую. При прохождении через пластинку частица, естественно, могла только потерять энергию — увеличиться ее энергия не могла. Таким образом, направление движения частицы было установлено достаточно определенно, и отвечало оно частице, обладающей положительным зарядом.

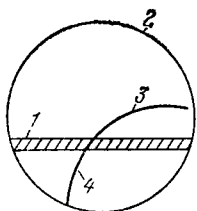


Рис. 4. Схема опыта Андерсона по наблюдению позитрона, проходящего через свинцовую пластинку, которая помещена в камеру Вильсона: 1 — свинцовая пластинка; 2 — окно камеры Вильсона; 3 — более искривленная часть трека; 4 — менее искривленная часть трека

Открытие Андерсона подтверждало предположение о том, что электронам соответствует античастица — позитрон. Это, на самом деле, основная идея всей атомной теории. Для всех частиц, которых в любом состоянии может быть не больше одной и которые называются фермионами, существуют как состояния с отрицательной энергией, так и состояния с положительной энергией. Состояния с отрицательной энергией в вакууме заполнены целиком, а точнее — почти целиком. Любая дырка среди состояний с отрицательной энергией соответствует античастице. Это утверждение справедливо и для протонов (существуют антипротоны), и для нейтронов (существуют антинейтроны); все эти частицы наблюдались на опыте.

Приняв концепцию антиматерии, мы должны существенно изменить свои представления о том, что подразумевать под фундаментальной, или элементарной, частицей. Частицы могут создаваться каким-то другим видом энергии, например энергией электромагнитных волн. Внося в вакуум возмущение, электромагнитные волны могут выбить электрон из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией; так возникнут электрон и позитрон. Они рождаются одновременно. Электрический заряд в этом случае, конечно, сохраняется, а энергию должен поставлять внешний источник. Сказанное относится и к фермионам.

Если мы можем создавать частицы, то вопрос о том, из каких фундаментальных частей состоит материя, теряет свою определенность. Раньше можно было утверждать, что достаточно лишь как можно подробнее изучить какое-то определенное количество вещества, чтобы узнать его первичные составляющие. Но если мы научились создавать частицы с помощью атомных взаимодействий, то мы уже не можем точно определить, что такое элементарная частица. Благодаря современному уровню развития физики, открыто очень много частиц. Вместо тех двух, о которых мы говорили (электрона и протона), их сейчас известно двести или что-то около

этого. Многие из них нестабильны, одни в большей степени, другие — в меньшей.

Задавая вопрос о том, какие из этих новых частиц элементарные, вы на самом деле не можете рассчитывать на точный ответ. Можно склоняться к тому, что более стабильные частицы являются элементарными, а менее стабильные не являются, но это деление весьма искусственно. Например, протон и нейтрон во многом очень схожи, но протон стабилен, а нейтрон нестабилен. Они настолько похожи, что было бы неразумно один считать элементарнее другого. Таким образом, вопрос о том, какие частицы являются элементарными, представляет собой одну из еще не решенных задач, над которыми сейчас работают физики.

Я рассказал вам о том, как развивалась квантовая механика, и, в частности, коснулся вопроса о том, как ее согласовать с механикой теории Эйнштейна, необходимой при больших скоростях. В результате мы приходим к концепции антиматерии. Однако проблемы квантовой теории этим не решаются. Остается еще немало вопросов, связанных с построением точной теории взаимодействия заряженной частицы с электромагнитным полем.

Используя модель заряженной частицы, в которой заряд считается сосредоточенным в точке, вы увидите, что энергия, соответствующая точечному заряду, оказывается бесконечной. Это одна из типичных трудностей, возникающих при попытках построить точную теорию взаимодействия частиц.

Современная квантовая теория прекрасно «работает» до тех пор, пока мы не требуем от нее слишком многого — пока мы не пытаемся применить ее к частицам очень высоких энергий и использовать на очень малых расстояниях. Если мы все же попробуем это сделать, то получим уравнения, решения которых не имеют смысла. Взаимодействия, с которыми мы имеем дело, всегда приводят к бесконечностям. Эта задача волнует физиков вот уже 40 лет, но пока в ее решении нет сколько-нибудь существенного прогресса.

Трудности, о которых мы говорили, заставляют меня думать, что основы квантовой механики еще не установлены. Исходя из современных основ квантовой механики, люди затратили колоссальный труд, чтобы на примерах отыскать правила устранения бесконечностей в решении уравнений. Но все эти правила, несмотря на то, что вытекающие из них результаты могут согласовываться с опытом, являются искусственными, и я не могу согласиться с тем, что современные основы квантовой механики правильны.

Ситуация, которая сейчас сложилась с бесконечностями, напоминает мне время, когда использовали волновое уравнение, содержащее член $\partial^2/\partial t^2$. Я думаю, что люди зря слишком легко принимают теорию, наделенную принципиальными недостатками; очевидно, продвижение вперед возможно лишь в том случае, если будет произведено какое-нибудь фундаментальное изменение теории, почти такое же фундаментальное, как переход от уравнения (7) к уравнению (9).