

# Предсказание антивещества\*)

*Первая лекция памяти Х. Р. Крейна, прочитанная 17 апреля 1978 года в Мичиганском университете (Энн-Арбор, Мичиган)*

Я очень счастлив, что приехал сюда, в Энн-Арбор, во второй раз. Я был здесь 49 лет назад и в течение шести недель преподавал в летней школе: читал один из первых курсов по новой квантовой механике. Это было в 1929 году.

Сегодня я буду говорить примерно о том же периоде истории науки, но опишу его с несколько иной точки зрения. Я расскажу о предсказании антивещества.

Как же делаются предсказания? Основное требование состоит в том, что надо иметь теорию и твердо в нее верить. Надо быть готовым к тому, чтобы всегда следовать выводам этой теории с ощущением, что принять эти следствия просто *необходимо*, к чему бы они ни привели. Поэтому прежде всего я должен показать вам, как возникла эта теория, которой я так доверял, и почему я доверял ей так сильно.

**Происхождение квантовой механики.** Этой теорией была квантовая механика, предложенная Гейзенбергом. Чтобы оценить эффект, произведенный этой теорией, достаточно осознать громадные трудности, которые были у нас до нее. Мы просто замучились с теорией атома Бора. Теория Бора давала хорошие результаты, пока речь шла об одном электроны. Но на этом пути нельзя было далеко продвинуться. В спектроскопии исследовались по большей части атомы с несколькими электронами, и было совершенно непонятно, как учесть взаимодействие между электронами в рамках теории Бора. Была проделана большая работа, но положение оказалось совершенно безнадежным: сложные вычисления не давали полезных результатов.

Тогда Гейзенберг предложил поразительную новую идею. Он исходил из той точки зрения, что теория должна быть полностью построена на языке наблюдаемых величин, а в теории атома наблюдаемые величины, как правило, связаны сразу с двумя состояниями. Поэтому Гейзенберг пришел к выводу, что надо работать с совокупностями величин, каждая из которых относится к двум состояниям. В математике такие совокупности называются матрицами. Физические соображения послужили Гейзенбергу основой для построения алгебры матриц, и, как выяснилось, она совпадала с той, которую использовали математики. Важнейшим свойством этой алгебры была ее некоммутативность. Это значит, что в такой алгебре произведение  $a$  на  $b$  не равно произведению  $b$  на  $a$ .

\*) The Prediction of Antimatter. The 1st H. R. Crane Lecture. April 17, 1978.— Ann Arbor, Michigan: Univ. of Michigan, 1978.— P. 1—25.

Самым удивительным было то, что эта алгебра имела отношение к описанию физического мира. Как я слышал, когда Гейзенберг впервые обнаружил, что цепь его рассуждений приводит к тому, что  $a$ , умноженное на  $b$ , отличается от  $b$ , умноженного на  $a$ , он был крайне обеспокоен этим. Ему показалось, что здесь какая-то ошибка. Однако у него просто не было другого выхода. Необходимо было принять алгебру нового типа и посмотреть, к чему это приведет.

К счастью для меня, когда появилась эта новая алгебра, я был аспирантом, так что я мог обрабатывать «целину» и выяснить, что из этого получится. Очень скоро я обнаружил, что можно построить динамическую теорию, весьма похожую на старую динамику Ньютона, но основанную на алгебре нового типа. В новой динамике у нас были все динамические координаты  $q$  и сопряженные им импульсы  $p$ , но  $p$  и  $q$  были связаны соотношением

$$qp - pq = i\hbar. \quad (1)$$

Здесь  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\hbar$  — постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ .

Полученное соотношение надо было ввести в динамику, а это можно было сделать непосредственно, придав динамике форму, найденную Гамильтоном за 100 лет до того времени. Уравнения движения любой динамической переменной представлялись в совершенно определенном виде: величина  $u$  должна меняться со временем согласно уравнению

$$i\hbar \frac{du}{dt} = uH - Hu, \quad (2)$$

где  $H$  — полная энергия динамической системы, которую мы рассматриваем.

Нужно было ввести эти уравнения, заменив ими уравнения движения старой ньютоновой механики. Эта работа была увлекательным и приятным делом. Перед студентом открывалось большое поле исследовательской работы. Было радостно начинать в этой ситуации свои исследования, хотя, конечно, возникало немало проблем.

**Интерпретация квантовой механики.** Прежде всего возник вопрос, как интерпретировать эти уравнения. Сложилось совершенно беспрецедентное положение, когда были найдены уравнения, но неизвестно было, как их понимать. В некоторых простых случаях еще можно было строить догадки. Но понадобилось еще несколько лет, прежде чем был получен общий метод интерпретации.

Давайте посмотрим, в чем трудность. Если мы просто положим  $p=3$  и  $q=4$ , то, разумеется, будет  $3 \cdot 4 = 4 \cdot 3$ , а это не согласуется с тем, что  $pq - qp$  отлично от нуля. Некоммутирующим величинам просто нельзя придавать числовые значения. Поэтому нам и нужна новая интерпретация, чтобы связать эти уравнения с величинами, которые мы наблюдаем.

Новая интерпретация возникла в рамках другого формализма, предложенного Шрёдингером. Шрёдингер работал совершенно независимо от Гейзенберга и пришел к формализму, который вначале казался совсем отличным от гейзенберговского. Однако вскоре Шрёдингеру удалось показать, что в действительности его форма-

лизм эквивалентен гейзенберговскому и существует математическое преобразование, которое их связывает.

Согласно Шрёдингеру, состояние динамической системы описывается волновой функцией  $\psi$ . Для одной частицы  $\psi$  является функцией ее координат  $x_1, x_2, x_3$ , а связанные с этими координатами импульсы представляют собой при этом операторы, действующие на волновую функцию. Следует положить  $p_1 = -i\hbar\partial/\partial x_1$ , и аналогично для  $p_2$  и  $p_3$ . Вместо уравнения движения Гейзенберга (2) в этом подходе надо работать с волновым уравнением

$$i\hbar d\psi/dt = H\psi, \quad (3)$$

где  $H$  — та же функция динамических переменных, что и в теории Гейзенберга, но теперь ее следует представить как функцию, зависящую от координат  $x$  и операторов  $\partial/\partial x$ .

Вскоре для волновой функции  $\psi$  в формализме Шрёдингера была найдена общая физическая интерпретация. При надлежащей нормировке  $|\psi|^2$  является вероятностью того, что частица находится в определенном месте. Нормировка означает просто умножение на подходящий числовой множитель, подобранный таким образом, чтобы полная вероятность была равна единице.

Теперь у нас есть формализм, позволяющий выяснить, с какой вероятностью данная частица находится в некотором месте в определенный момент времени. Детерминизма классической механики больше не существует. Теперь уже нельзя утверждать, что частица определенно находится в данном месте, можно лишь указать вероятность найти ее там. Частицу приходится представлять себе как некоторое распределение типа облака, плотность которого равна  $|\psi|^2$  и имеет смысл плотности вероятности.

Итак, у нас есть способ найти вероятность того, что частица занимает данное положение. А как обстоит дело с другими динамическими переменными? Можно ли говорить о вероятности того, что они принимают определенные значения?

Оказалось, что для  $\psi$ -функции можно развить теорию преобразований. Работа по созданию теории преобразований принесла мне, пожалуй, наибольшее удовольствие из всех моих исследований, потому что можно было проводить ее постепенно, шаг за шагом, ощущая, что продвигаешься куда-то логическим путем, а не в результате внезапной догадки, как было во многих моих работах.

С помощью этой теории преобразований можно было превратить  $\psi$ , скажем, в функцию импульсных переменных, так что она принимала вид  $\psi(p_1, p_2, p_3)$ , или же в функцию любого другого набора коммутирующих между собой переменных. Преобразовав таким образом  $\psi$ , можно было интерпретировать  $|\psi|^2$  как вероятность того, что выбранные переменные принимают определенные значения. Таким образом мы можем рассматривать вероятность того, что любые переменные принимают заданные значения, если только эти переменные коммутируют друг с другом. Двум переменным, не коммутирующим между собой, как  $q$  и  $p$ , нельзя одновременно придать числовые значения. Это не имеет смысла.

Теперь у нас появился общий метод физической интерпретации волновой функции Шрёдингера. Я был очень рад этому, хотя другие физики в то время явно не оценили его значения.

То обстоятельство, что теперь можно было иметь дело только с вероятностями и пришлось отказаться от детерминизма классической теории, многим физикам было трудно принять, но в квантовой механике это оказалось неизбежным, и всем нам следовало смириться с этим обстоятельством. В течение долгого времени шли многочисленные споры о том, насколько это необходимо. В частности, Шрёдингер всегда надеялся получить детерминистскую интерпретацию своей волновой функции, и Эйнштейн также был сторонником какой-нибудь детерминистской интерпретации. Но все попытки, предпринятые в этом направлении, оказались безуспешными, и вероятностная интерпретация волновой функции стала непреложной. Ничего лучшего в квантовой механике добиться нельзя, и до настоящего времени всем студентам-физикам приходится этому учиться.

**Великая сила квантовой механики.** Теперь мы имели определенные уравнения движения и определенную интерпретацию, хотя эта интерпретация и оказалась не столь четкой, к какой мы привыкли в классической механике. И все же это было нечто такое, что можно было принять и научиться использовать. К тому же выяснилось, что этот формализм допускает весьма широкие обобщения. Прежде всего он был построен по аналогии с формализмом классической механики. Новую механику можно формулировать в терминах обобщенных координат  $q$  и сопряженных им импульсов  $p$ , только  $p$  и  $q$  надо было считать некоммутирующими, в соответствии с формулой (1). Далее, выбирая подходящую функцию  $H$ , можно было в квантовой теории получить динамическую систему, аналогичную любой динамической системе в классической теории.

Однако надо было выйти за эти рамки и работать с основными динамическими переменными, отличными от  $q$  и  $p$  и удовлетворяющими другим перестановочным соотношениям. Например с операторами перестановок, или же с операторами, представляющими вращение тела в трехмерном пространстве, или вообще с операторами, соответствующими элементам любой группы: наконец, с операторами испускания и поглощения частиц.

Существуют весьма широкие возможные обобщения такого рода, не имеющие аналогов в классической механике. И все же для них можно сформулировать уравнения движения типа гейзенберговских уравнений (2), если выбрать подходящий гамильтониан  $H$ , и получить интерпретацию волновой функции в терминах более общих переменных, не имеющих аналогов в классической теории.

Все это казалось вполне приемлемым и было весьма воодушевляющим, особенно для молодого начинающего ученого, и я чувствовал себя просто счастливым. Самое большое впечатление произвела на меня огромная сила новой теории. Но существовала одна серьезная трудность. Как согласовать эту теорию с относительностью?

**Трудности с теорией относительности.** Относительность была введена Эйнштейном: специальная и общая теории. Общая теория

занимается гравитационными полями, а эти поля совершенно несущественны для атомной физики, так что о них и об общей теории относительности можно забыть. Но со специальной теорией относительности следует считаться: она нужна нам, если мы имеем дело с частицами, которые движутся со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Механика Ньютона применима только к частицам, движущимся медленно по сравнению со светом, и совершенно не годится для больших скоростей. Поэтому необходимо привести наши основные уравнения в согласие со специальной теорией относительности, если мы хотим иметь квантовую теорию, применимую к быстро движущимся частицам.

Специальную теорию относительности можно сформулировать, объявив, что временная координата должна входить симметрично с пространственными координатами  $x_1, x_2, x_3$ , с точностью до изменения знака в некоторых членах уравнений. Однако если мы взглянем на имеющиеся уравнения, например на уравнение Гейзенберга (2) или Шрёдингера (3), то убедимся, что время входит в них особым образом. Оно явно входит в левую часть уравнения, а  $x_1, x_2, x_3$  — координаты, от которых зависит гамильтониан в правой части. Никакой симметрии нет. Как же сделать эту теорию релятивистской?

Возьмем уравнение Шрёдингера (3), где импульсные переменные равны операторам дифференцирования по координатам, и положим соответственно  $W = i\hbar \partial/\partial t$ . Тогда уравнение (3) можно записать в виде

$$(W - H)\psi = 0. \quad (4)$$

Теперь, если использовать ньютонову форму для энергии  $W$ , то кинетическая энергия частицы войдет в виде

$$H = (p_1^2 + p_2^2 + p_3^2)/2m. \quad (5)$$

Каждый из импульсов  $p$  интерпретируется как оператор  $\partial/\partial x$ . Подставляя (5) в (4), видим, что  $\partial/\partial t$  и  $\partial/\partial x_1, \partial/\partial x_2, \partial/\partial x_3$  входят в уравнение совершенно различно: уравнение линейно по  $\partial/\partial t$  и квадратично по остальным производным  $\partial/\partial x$ .

Но формула (5) дает ньютонову кинетическую энергию частицы. Для быстрых частиц формула не применима, ее надо заменить формулой Эйнштейна:

$$[H = c(m^2c^2 + p_1^2 + p_2^2 + p_3^2)^{1/2}. \quad (6)$$

Представим себе, что это выражение для  $H$  стоит в уравнении Шрёдингера. Тогда мы имеем уравнение, в которое входят производные по времени и по трем координатам, но входят они совершенно по-разному: производные по координатам стоят под знаком квадратного корня.

Что можно сделать, чтобы устранить эту асимметрию? Один из возможных способов — замена уравнения  $(W-H)\psi=0$  на  $(W^2-H^2)\psi=0$ . Тогда мы получим уравнение, в котором имеется  $\partial^2/\partial t^2$  от  $W^2$  и производные  $\partial^2/\partial x_1^2, \partial^2/\partial x_2^2, \partial^2/\partial x_3^2$  от  $H^2$ . При этом время и координаты входят симметрично, как того требует специаль-

ная теория относительности, и уравнение имеет вид

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

Именно это уравнение было предложено де Бройлем за некоторое время до описываемых событий; его называют уравнением де Бройля. Он просто «догадался» о его форме, заметив, что это красивое уравнение, связывающее волны с частицами. Волна, удовлетворяющая этому уравнению, связана с частицей, имеющей импульс с компонентами  $p_1, p_2, p_3$  и энергию  $W$ .

Далее это уравнение можно изменить, чтобы учесть присутствие электромагнитного поля. Мне бы не хотелось выписывать это уравнение, оно довольно сложное. Достаточно заметить, что оно удовлетворяет требованиям теории относительности и похоже на уравнение Шрёдингера. Это уравнение называется уравнением Клейна — Гордона. На самом деле оно было впервые открыто Шрёдингером, но он не опубликовал полученный результат, так как из этого уравнения не получается правильный спектр атома водорода. Шрёдингер был настолько обескуражен этим обстоятельством, что так и не послал работу в печать. Работа, в которой приводилось это уравнение, была позже опубликована Клейном и Гордоном, и уравнение получило их имя.

Многие физики были готовы использовать уравнение Клейна — Гордона и заняться поисками его интерпретации. Интерпретация состояла в том, чтобы принять величину

$$\bar{\psi} \frac{d\psi}{dt} - \psi \frac{d\bar{\psi}}{dt} \quad (8)$$

(черта означает комплексное сопряжение) за плотность заряда, а не за плотность вероятности, связанной с данной волной. Эту величину нельзя назвать вероятностью, так как она может быть и положительной, и отрицательной. Чтобы интерпретировать какую-либо величину как вероятность, она должна быть всегда положительной, как, например,  $|\psi|^2$  в первоначальной теории Шрёдингера. Но выражение (8) можно интерпретировать как плотность заряда, в соответствии с теорией относительности.

Итак, большинство физиков в то время были согласны работать с уравнением Клейна — Гордона, используя эту интерпретацию. Мне же это не нравилось, так как нарушались основные идеи теории Шрёдингера. Теория преобразований оказывалась неприменимой: в отличие от  $\psi$ -функции в теории Шрёдингера, новую  $\psi$ -функцию нельзя было преобразовать таким образом, чтобы она относилась к другим динамическим переменным. Оказалось невозможно получить положительные величины, которые можно было бы интерпретировать как вероятности в каком бы то ни было общем виде.

Обсуждая в то время эту проблему с другими физиками, я был поражен тем, как легко они приняли теорию Клейна — Гордона; их, казалось, совсем не беспокоил тот факт, что нарушаются основные принципы этого красивейшего и плодотворного подхода, о ко-

торых я только что говорил здесь. Создавшееся положение очень меня беспокоило, я целиком погрузился в эту проблему и поверил, что должна существовать какая-то возможность найти другое волновое уравнение, которое можно было бы согласовать как с теорией преобразований, так и с теорией относительности.

Этот вопрос непрерывно волновал меня, что и привело к решению. Существенно, что уравнение должно быть линейно по  $\partial/\partial t$ , как уравнение (4), а не квадратично. Но если оно будет линейно по  $\partial/\partial t$ , то оно должно также быть линейно по  $\partial/\partial x_1$ ,  $\partial/\partial x_2$ ,  $\partial/\partial x_3$ ; иными словами, из линейности по  $W$  следует линейность по  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ . Это необходимо, чтобы сохранить пространственно-временную симметрию.

**Релятивистское волновое уравнение.** Лишь только вы поймете необходимость такой теории, построить ее окажется нетрудно. Так я пришел к уравнению

$$(W - \alpha_1 p_1 - \alpha_2 p_2 - \alpha_3 p_3 - \alpha_4 mc) \psi = 0, \quad (9)$$

где в качестве коэффициентов введены некоторые новые динамические переменные  $\alpha$ . Получилось уравнение, с самого начала симметричное относительно  $W$  и  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , т. е. обладающее симметрией, которая требуется специальной теорией относительности. При этом возникают новые динамические переменные  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$ , и их следует интерпретировать как операторы, действующие на  $\psi$ -функцию.

Для того чтобы уравнение (9) было похоже на уравнение де Бройля (7), приведенное выше, необходимо, чтобы все  $\alpha$  антикоммутировали между собой и квадрат каждого из них был равен 1. Подобрать матрицы, действующие на  $\psi$  и обладающие такими свойствами, т. е.  $\alpha_i^2 = 1$  и  $\alpha_1 \alpha_2 = -\alpha_2 \alpha_1$ , совсем нетрудно.

Эти матрицы должны иметь четыре строки и четыре столбца, и я могу заметить, в порядке исторического комментария, что в действительности додуматься до них было непросто. До этого все привыкли к матрицам с двумя строками и двумя столбцами, которые используются в теории Паули, описывающей спин электрона. Однако, используя лишь такие матрицы, нельзя удовлетворить всем условиям для четырех матриц  $\alpha$  с требуемыми свойствами, можно найти лишь тройку подобных матриц. Мне понадобилось несколько недель, чтобы совершить скачок от матриц второго порядка к матрицам четвертого порядка, хотя теперь это кажется довольно тривиальным.

Волновая функция  $\psi$  должна иметь четыре компоненты, которые можно записывать одну под другой в виде матрицы с одним столбцом, и тогда каждая из матриц  $\alpha$ , действуя на четырехкомпонентную  $\psi$ -функцию, будет вновь давать величину с четырьмя компонентами. Таким образом, получается новое волновое уравнение, согласующееся с основными принципами квантовой механики и с требованием симметрии с точки зрения специальной теории относительности. Оказалось, что это волновое уравнение автоматически дает спин электрона, равный половине кванта действия, а также магнитный

момент. В уравнение легко можно добавить дополнительные члены, описывающие движение электрона в электромагнитном поле, и тогда возникает магнитный момент, имеющий притом нужное значение.

Это было неожиданной удачей; в то время я еще не пытался построить теорию спина электрона. Мне хотелось лишь найти теорию, которая была бы в согласии с принципами квантовой механики и с основными требованиями теории относительности. Я думал тогда, что сначала надо решить задачу для бесспиновой частицы, а потом уже ввести спин, так что здесь успех пришел неожиданно.

**Появление трудности с отрицательными энергиями.** Новое волновое уравнение устранило одни трудности, но зато возникли другие. Главная из них состояла в том, что некоторые решения волнового уравнения описывали состояния, в которых частица обладала отрицательной энергией. Действительно, у  $\psi$ -функции четыре компоненты, а для описания электрона со спином, равным половине кванта действия, нужно лишь две компоненты, так как электрон имеет два независимых спиновых состояния. Таким образом, получилось дополнительное удвоение числа состояний, которое связано с тем, что исходное уравнение допускает решения с отрицательными энергиями.

Итак, возникла проблема, как понимать состояния движения электронов с отрицательными энергиями. В действительности эта проблема не была новой. Как только была принята формула Эйнштейна для энергии (6), появился квадратный корень, который, конечно, может иметь как положительное, так и отрицательное значение, так что отрицательные энергии связаны просто с формулой Эйнштейна. Однако прежде они не внушали беспокойства, потому что частица, обладавшая ранее положительной энергией, не перейдет в состояние с отрицательной энергией, поскольку ее динамика определяется классической теорией.

Согласно теории Эйнштейна, уровни энергии принимают все значения от  $mc^2$  до бесконечности, а также от  $-mc^2$  до минус бесконечности. Если мы начнем с частицы, находящейся на одном из уровней с положительной энергией, то, согласно классической механике, она всегда останется в состоянии с положительной энергией. Но этот вывод становится неверным, если мы переходим к квантовой механике, потому что тогда динамические переменные могут изменяться скачкообразно, не проходя через промежуточные значения. Поэтому если начальное состояние и обладало положительной энергией, оно может перейти в состояние с отрицательной энергией.

Эти скачки между положительными и отрицательными энергиями существовали уже в теории Клейна — Гордона, но они сначала не вызывали беспокойства, потому что были более серьезные проблемы. Когда эти проблемы удалось решить, а вопрос об отрицательных энергиях остался, он приобрел первоочередную важность. Так что, используя для описания электрона волновое уравнение (9), мы тут же столкнулись с вопросом, что же делать с отрицательными энергиями.



Если электрон находится в электромагнитном поле и мы начали с состояния, соответствующего положительной энергии, то он может перескочить в состояние с отрицательной энергией под влиянием этого поля. Шрёдингер рассмотрел этот вопрос и предложил внести в уравнение, содержащее электромагнитное поле, небольшую поправку, благодаря которой можно будет исключить переходы между состояниями с положительными и отрицательными энергиями. Однако такая поправка разрушила бы красоту самого уравнения. Шрёдингер показал, что при этом согласие теоретических значений уровней энергии водорода с экспериментальными данными почти не нарушится, однако релятивистские свойства теории и вся ее красота будут утрачены. Поэтому подобное изменение неприемлемо.

Итак, на какое-то время вопрос об отрицательных энергиях стал серьезнейшей проблемой. Разумеется, с физической точки зрения они недопустимы; экспериментаторы никогда не видят состояний с отрицательными энергиями. И тогда мне пришло в голову, что раз мы не можем исключить эти состояния, мы должны примириться с их существованием и найти для них подходящую физическую интерпретацию.

**Новое представление о вакууме.** Разумную физическую интерпретацию возникших состояний можно получить, используя другое свойство электронов, которое открыл Паули незадолго до этого. Паули показал, что всю таблицу химических элементов можно естественным образом объяснить, предположив, что в любом квантовом состоянии не может быть более одного электрона. Здесь имеется в виду полное состояние движения электрона с учетом его спина. Указанное предположение известно как принцип запрета Паули. Это одно из основных свойств электронов. Два электрона никогда не могут находиться в одном состоянии.

Предположим теперь, что в известном нам физическом мире все состояния с отрицательными энергиями содержат по одному электрону. Нам придется потребовать бесконечно высокой плотности электронов, потому что состояния с отрицательными энергиями существуют неограниченно, до минус бесконечности. Электроны, заполняющие состояния с отрицательными энергиями, можно представлять себе как бездонное море. В действительности не так уж трудно вообразить бездонное море. Мы интересуемся только тем, что происходит вблизи поверхности, и можем вполне разумно описывать такие процессы, забыв о бесконечной плотности электронов, лежащих ниже интересующего нас уровня.

Надо предположить, что по какой-то причине эти электроны не дают вклада в электромагнитное поле, в соответствии с уравнением Максвелла

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho. \quad (10)$$

Мы должны считать, что в вакууме все состояния с положительными энергиями свободны, а состояния с отрицательными энергиями заняты, и в плотность электрического заряда  $\rho$  в уравнении (10) дают вклад лишь отклонения от указанного вакуумного распределения.

На таких условиях бесконечное море электронов, обладающих отрицательными энергиями, становится приемлемым. Вопрос о скачках электронов из состояний с положительной энергией в состояния с отрицательной энергией не вызывает затруднений: эти скачки невозможны из-за принципа запрета Паули.

**Появление дырок.** Переход электрона в состояние с отрицательной энергией возможен только в том случае, когда в распределении состояний с отрицательными энергиями возникает дырка. При этом и электрон, и дырка исчезают, а их энергия должна проявиться в какой-то иной форме. Эти дырки в распределении электронов с отрицательными энергиями являются новым свойством нашей теории, и надо найти их физический смысл.

Мне кажется, что на самом деле мы уже столкнулись с этой ситуацией, приняв волновое уравнение (9) и выяснив, что избежать переходов между положительными и отрицательными энергиями невозможно. Нужно усвоить, что вакуум — это область, где все состояния с отрицательными энергиями заполнены. Обычно полагают, что вакуум — это область пространства, где вовсе ничего нет, но более правильно считать, что вакуум — это область пространства; находящаяся в состоянии с наименьшей возможной энергией. Если мы заполняем состояния с отрицательной энергией, то полная энергия уменьшается. Чем больше таких состояний заполнено, тем ниже должна быть полная энергия, и когда все они заполнены, энергия достигает минимального значения. Таким образом, наша картина вакуума соответствует состоянию, в котором данная область пространства обладает наименьшей энергией, что вполне разумно с физической точки зрения.

Итак, мы пришли к новому виду частиц, ведущих себя как дырки в распределении состояний с положительной энергией. Дырка должна обладать положительной энергией, так как для ее исчезновения надо внести отрицательную энергию. Посмотрим, как ведет себя дырка в электромагнитном поле. Она будет двигаться примерно так же, как электрон, которым можно ее заполнить. В сущности, если пренебречь квантовыми эффектами, то мы вправе использовать уравнения движения Лоренца, описывающие движение заряженной частицы в электромагнитном поле, и оказывается, что частица с отрицательной энергией движется как частица с положительной энергией и противоположным зарядом. Следовательно, дырка в распределении электронов с отрицательной энергией движется так, как если бы она имела положительный заряд, иными словами, — как частица с положительной энергией и положительным зарядом.

Какой массой должна обладать эта частица? Когда я представлял себе эту картину, мне казалось, что теория совершенно симметрична относительно знака энергии, так что у дырки должна быть такая же масса, как у электрона. Но в то время единственной известной частицей с положительным зарядом был протон. Люди верили, что материя состоит только из электронов и протонов, а других частиц нет. Две частицы были нужны, потому что существовало два вида электричества, положительное и отрицательное. Электроны

требовались для отрицательного электричества, а протоны — для положительного, и этого было достаточно.

На том этапе я просто не посмел постулировать существование новой частицы, потому что тогда научная общественность была решительно против введения новых частиц. Поэтому я подумал, что дырка — это протон. Я прекрасно знал, что между массами протона и электрона огромная разница, но думал, что каким-то образом кулоновское взаимодействие между электронами в море может привести к изменению массы покоя дырки. В результате я опубликовал свою статью на эту тему как теорию электронов и протонов.

Однако очень скоро я столкнулся с оппозицией со стороны математиков, прежде всего Г. Вейля, который категорически заявил, что новая частица должна иметь ту же массу покоя, что и электрон, и потому она должна соответствовать какому-то объекту, неизвестному в физике того времени.

**Экспериментальное открытие позитрона.** Через несколько лет была открыта новая частица с массой электрона и положительным зарядом. Блэккетт, который работал в то время в Кембридже, первый сказал мне, что у него есть данные о новой частице.

Эти данные были получены при изучении фотографий заряженных частиц, движущихся в магнитном поле, которое закручивает их траектории, в камере Вильсона. Положительные и отрицательные частицы закручиваются полем в противоположные стороны. Если просто посмотреть на искривленный трек на фотографии, то нельзя сказать, оставлен ли он положительно заряженной частицей или же отрицательно заряженной, но движущейся в противоположном направлении. Исследователи нередко замечали, что если интерпретировать все треки как отрицательно заряженные электроны, то иногда встречаются треки, ведущие в радиоактивный источник. Они считали это простым совпадением. Но Блэккетт, изучавший этот вопрос, обнаружил, что такие события происходят слишком часто, чтобы быть совпадением, и потому наблюдаемые треки должны интерпретироваться как положительные частицы, испускаемые источником.

Блэккетт не хотел публиковать свои результаты без основательной проверки, но пока он их проверял, Андерсон совершенно независимо опубликовал свой опыт, доказывающий, что позитрон действительно существует.

Доказательство Андерсона было совсем простым. У него одна из этих частиц прошла сквозь свинцовую пластинку, и он заметил, что с одной стороны пластинки трек больше искривлен, чем с другой. Там, где трек искривлен сильнее, частица должна иметь меньшую скорость. Частица не может приобрести энергию, проходя сквозь свинцовую пластинку, она может только потерять ее, поэтому вначале частица проходит со стороны, где трек искривлен меньше, и это позволяет определить направление движения. Таким образом удалось обнаружить трек частицы с положительным зарядом. Так, на основании всего одной картинки Андерсон мог утверждать, что видел позитрон.

С тех пор позитроны наблюдались несчетное число раз. Удивительно, что их не видели раньше. На самом деле, на части ранних фотографий, опубликованных до указанных работ Андерсона и Блэккетта, можно вполне ясно видеть треки частиц, которые интерпретировались тогда как электроны, летящие в источник.

**Антивещество в целом.** Я изложил последовательность доводов, которая привела к представлению об антивеществе. Первым элементом антивещества были антиэлектроны. Те же аргументы применимы к другим физическим частицам, если они подчиняются принципу запрета Паули. Таких частиц несколько; примерами являются протоны и нейтроны. Эти частицы можно описывать волновым уравнением того же вида (9); дополнительные усложнения возникают из-за того, что на них действуют другие силы, помимо электромагнитных. Для них применимы те же представления, когда существуют состояния с положительными и отрицательными энергиями, причем в вакууме все состояния с отрицательной энергией заполнены. Тогда существует возможность того, что некоторые состояния с отрицательными энергиями не заполнены, и они ведут себя как частицы другого типа, обладающие той же массой и противоположным зарядом.

Всегда существует возможность родить пару, состоящую из частицы и античастицы. Возмущая вакуумное распределение, мы можем поднять одну частицу из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией, получив при этом наблюдаемую частицу с положительной энергией и дырку. Рождается пара — частица и античастица. Возможен также обратный процесс. Если есть античастица, то обычная частица может заполнить дырку, причем частица и античастица исчезнут, а их энергия перейдет в какую-то другую форму.

В случае электрона и позитрона энергия, требуемая для рождения пары, составляет примерно миллион вольт. В случае протона и антипротона или нейтрона и антинейтрона эта энергия намного больше, порядка тысячи миллионов вольт, но существующие в настоящее время ускорители позволяют достичь этой энергии. Уже удалось получить антипротоны и антинейтроны и даже более сложное антивещество. Я имею в виду антидейтрон, а также анти-<sup>3</sup>He. Думаю, это пока предел. По-видимому, все частицы, удовлетворяющие принципу Паули, обладают своими античастицами.

Ну а как быть с частицами, которые принципу Паули не подчиняются? Эти частицы называются бозонами. Они подчиняются статистике иного типа, отличной от той, которая определяется принципом Паули и справедлива для частиц, называемых фермионами. Для бозонов могут существовать античастицы, а могут и не существовать, бывает по-разному. Фотоны — это бозоны, и античастиц для них нет. У некоторых мезонов есть заряд, и для них существуют античастицы с зарядом противоположного знака. Разумеется, для бозонов представление о вакууме, имеющем заполненные состояния с отрицательной энергией, несправедливо, и вся теория усложняется.

Развитие идеи антивещества привело к тому, что понятие элементарной частицы стало менее определенным. Вначале считалось, что если вы берете кусок вещества, то его можно разбить на части. Продолжая дробление этих частей, вы в конце концов приходите к первичным составляющим. Но эта концепция становится несправедливой, если у вас есть возможность создавать частицы из энергии; облаченной в какую-нибудь другую форму. Тогда из этой энергии в любой момент можно создать частицу и античастицу, и вы уже не сможете считать, что они присутствовали в веществе изначально. Таким образом, теряется возможность простого описания того, что является первичными составляющими вещества.

В наши дни физикам, занимающимся частицами, приходится работать в более сложной ситуации, когда они имеют дело с множеством частиц, которые представляются в равной мере фундаментальными. Изучаются переходы этих частиц друг в друга. Мы все время получаем о них новую информацию, и этот процесс продолжает развиваться.

Что можно сказать об антивеществе в целом? Если взять кусок антивещества и поместить его по соседству с обычной материей, то они смогут прореагировать и произойдет аннигиляция. Вещество и антивещество исчезнут, и выделится громадная энергия в какой-либо форме. Антивещество — это самая сильная взрывчатка, которая нам известна. Гораздо более сильная, чем обычное ядерное вещество, используемое для получения ядерной энергии.

Конечно, если бы у нас был кусок антивещества, хранить его было бы исключительно трудно. Этот кусок пришлось бы держать в полном вакууме, и тогда антивещество было бы совершенно устойчиво. Но как только оно войдет в соприкосновение с обычным веществом, проявится его взрывная сила.

Может быть, в других частях нашей Вселенной и существуют звезды или галактики, состоящие из антивещества. Мы бы не узнали об этом. Антивещество обладало бы теми же спектральными характеристиками, что и обычное вещество, и чтобы его распознать, нужно ударить веществом по антивеществу, направив на антивещество обычные частицы материи.

Благодарю вас.