

Теория электронов и позитронов*)

Физики-экспериментаторы обнаружили, что материя состоит из маленьких частиц различного сорта, причем частицы каждого сорта в точности подобны друг другу. Некоторые из этих частиц, наверное, являются сложными, т. е. состоят из других частиц более простой природы. Однако существуют другие частицы, сложность которых не была показана до сих пор и, как мы надеемся, никогда не будет доказана, так что мы считаем их элементарными и основными.

На основании общих философских соображений хотелось бы, как кажется на первый взгляд, иметь возможно меньшее число элементарных частиц, лучше всего один сорт, или, в крайнем случае, два, так, чтобы вся материя была построена из них. Однако результаты эксперимента показывают, что основных частиц должно быть больше. В самом деле, число элементарных частиц стремилось довольно катастрофически увеличиваться в течение последних лет.

Пожалуй, такое положение вещей не столь скверно, так как более близкое рассмотрение показывает, что нельзя провести строгого различия между элементарными и сложными частицами. Для интерпретации некоторых новейших экспериментов необходимо предположить, что частицы могут создаваться и уничтожаться. Поэтому, если мы наблюдали какую-либо частицу, вылетевшую из другой, мы не можем с уверенностью утверждать, что последняя является сложной, так как первая частица могла оказаться созданной вновь. Различие между элементарными и сложными частицами становится поэтому условным. Одного этого соображения достаточно, чтобы принудить нас оставить привлекательную с философской точки зрения мысль, что вся материя построена из кирпичиков одного или, может быть, двух сортов.

Я хотел бы остановиться здесь на обсуждении частиц более простого сорта и посмотреть, что можно сказать о них на основании чисто теоретических аргументов. Наиболее простыми видами частиц являются:

1. Фотоны, или световые кванты, из которых состоит свет.
2. Электроны и открытые недавно позитроны, являющиеся чем-то вроде зеркального изображения электронов и отличающиеся от последних только знаком электрического заряда.
3. Тяжелые частицы — протоны и нейтроны.

Я буду рассматривать здесь почти исключительно электроны и позитроны не потому, что они наиболее интересны, но потому, что теория для них была развита наиболее полно. В самом деле, вряд ли можно сделать какое-либо теоретическое заключение о свойствах остальных частиц. С одной стороны, фотоны столь просты, что легко укладываются в любую теоретическую схему, так что теория не накладывает никаких ограничений на их свойства. Протоны же и нейтроны, с другой стороны, представляются слишком сложными, и до сих пор не найдено надежное основание для построения их теории.

Вопрос, которого мы должны коснуться прежде всего, заключается в том, каким образом вообще теория может дать какие-либо сведения о свойствах элементарных частиц. В настоящее время существует общая система квантовой механики, которую можно применить для описания движения частиц любого сорта, каковы бы ни были свойства последних. Однако эта общая сис-

*) Лекция, прочитанная Дираком в Стокгольме при получении Нобелевской премии, присужденной ему и Э. Шрёдингеру в 1933 году. Печатается (с небольшими изменениями) с книги: *Гейзенберг В., Шрёдингер Э., Дирак П. А. М.* Современная квантовая механика: Три Нобелевских доклада/ Пер. с англ. под ред. Д. Д. Иваненко. — М.; Л., 1934. Одновременно с Дираком была вручена премия по физике за 1932 год В. Гейзенбергу.

тема квантовой механики не пригодна для скоростей, сравнимых со скоростью света, когда начинают играть роль эффекты теории относительности. В настоящее время не существует релятивистской квантовой механики, пригодной в случае больших скоростей, которая могла бы применяться к частицам с произвольными свойствами. Поэтому, подвергая квантовую механику релятивистскому обобщению, мы накладываем тем самым ограничения на свойства частиц. Таким путем можно вывести ряд заключений о частицах из чисто теоретических соображений, основанных на общих физических принципах.

Этот метод оказался удачным в случае электронов и позитронов. Следует надеяться, что в будущем аналогичная теория будет построена и для других частиц. Я хочу описать здесь общие черты теории электронов и позитронов, показав, каким путем можно вывести свойства спина («вращения») электрона и сделать заключение о существовании позитронов с подобными же свойствами спина, способных притом уничтожаться при столкновении с электронами.

Мы имеем прежде всего уравнение, связывающее кинетическую энергию \mathcal{W} и количество движения p_r ($r=1, 2, 3$) частицы в релятивистской классической механике

$$\mathcal{W}^2/c^2 - p_r^2 - m^2c^2 = 0. \quad (1)$$

Отсюда возможно получить волновое уравнение квантовой механики, подразумевая под \mathcal{W} и p_r операторы $i \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t}$ и $-i \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x_r}$ и действуя левой частью уравнения на волновую функцию ψ . Теперь мы можем записать волновое уравнение

$$[\mathcal{W}^2/c^2 - p_r^2 - m^2c^2]\psi = 0. \quad (2)$$

Вспомнив теперь общее требование квантовой механики, чтобы всякое волновое уравнение было линейным относительно оператора \mathcal{W} или $\partial/\partial t$, мы увидим, что наше уравнение ему не удовлетворяет. Мы должны заменить его каким-то уравнением, линейным по \mathcal{W} , а чтобы уравнение было релятивистски-инвариантным, оно должно быть также линейным относительно p_r . Таким образом, мы приходим к рассмотрению уравнения вида

$$[\mathcal{W}/c - \alpha_r p_r - \alpha_0 mc]\psi = 0. \quad (3)$$

Это уравнение включает в себя четыре новых переменных α_r и α_0 , которые являются операторами, действующими на функцию ψ . Предположим, что они удовлетворяют следующим условиям: $\alpha_\mu^2 = 1$; $\alpha_\mu \alpha_\nu + \alpha_\nu \alpha_\mu = 0$ для $\mu \neq \nu$; $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$, а также что α коммутируют со всеми p и \mathcal{W} . Эти свойства α делают уравнение (3) до некоторой степени эквивалентным уравнению (2), так как, умножив (3) слева на $\mathcal{W}/c + \alpha_r p_r + \alpha_0 mc$, мы получим точно уравнение (2). Новые переменные α , которые надо ввести, чтобы получить релятивистское волновое уравнение, линейное по \mathcal{W} , дают спин электрона. Из общих принципов квантовой механики легко вывести, что переменные α приводят к значению спинового момента количества движения, равному половине кванта действия, деленного на 2π , и к значению магнитного момента, равному магнетону Бора и направленному против момента количества движения. Эти результаты находятся в полном согласии с экспериментом. На самом деле они и были впервые получены из спектроскопических наблюдений и подтверждены впоследствии теорией.

Величины α приводят также к некоторым совершенно неожиданным явлениям, связанным с движением электрона. Этот вопрос был подробно исследован Шрёдингером. Оказывается, что электрон, который представляется нам медленно движущимся, в действительности должен проделывать колебательное движение очень большой частоты и малой амплитуды, которое накладывается на наблюдаемое нами равномерное движение. В результате этого колебательного движения, скорость электрона всегда равняется скорости света. Это следствие теории не может быть непосредственно проверено экспериментом, так как частота колебательного движения очень высока, а ам-

плитуда незначительна. Но мы должны доверять этому следствию теории, так как другие выводы из нее, неразрывно связанные с только что указанным парадоксальным следствием, например закон рассеяния света электроном, подтверждаются экспериментом.

Наши уравнения обладают еще одним важным свойством, на которое я хотел бы указать здесь и которое привело к предсказанию позитрона. Из уравнения (1) мы видим, что оно допускает для кинетической энергии W или положительные значения, больше mc^2 , или отрицательные значения, меньшие $-mc^2$. Этот результат сохраняет свою силу и при переходе к квантовому уравнению (2) или (3). Таким образом, эти квантовые уравнения, будучи интерпретированы согласно общей схеме квантовой динамики, допускают в качестве возможных результатов измерения кинетической энергии W или какие-либо значения, большие mc^2 , или же значения, меньшие $-mc^2$.

В действительности кинетическая энергия частицы всегда положительна. Итак, мы видим, что наши уравнения допускают для электрона два вида движения, из которых только один соответствует привычному. Другой вид движения соответствует электронам с весьма странными свойствами: например, более быстрому движению соответствует меньшая энергия; чтобы заставить такой электрон остановиться, нужно сообщить ему энергию. Можно было бы поэтому попытаться ввести в теорию в качестве нового допущения, что только один из видов движения встречается в действительности. Но это приводит к серьезной трудности, так как мы находим из теории, что электрон под действием возмущения может перейти из состояния движения с положительной энергией в состояние движения с отрицательной энергией. Поэтому, даже если мы предположим, что все электроны в мире находятся вначале в состояниях положительной энергии, через некоторое время часть из них окажется в состояниях отрицательной энергии. Таким образом, допуская состояния отрицательной энергии, теория предсказывает нечто, по-видимому, не соответствующее чему-либо известному из эксперимента, но что мы, однако, не можем отбросить просто путем нового предположения. Итак, мы должны найти физический смысл отрицательных состояний.

Более детальное рассмотрение поведения электронов в этих состояниях в электромагнитном поле показывает, что они соответствуют движению электрона с положительным зарядом вместо обычного отрицательного, т. е. тому, что экспериментаторы называют теперь позитронами. Поэтому можно было бы попытаться допустить, что электроны в состояниях отрицательной энергии как раз являются позитронами. Но такое решение вопроса не годится, так как наблюдаемые на опыте позитроны не имеют отрицательных энергий. Мы можем, однако, установить связь между электронами в состояниях отрицательной энергии и позитронами иным, значительно менее прямым образом.

Вспользуемся принципом Паули, согласно которому в каждом состоянии движения может находиться только один электрон. Допустим теперь, что в известном нам мире почти все состояния отрицательной энергии для электронов заняты как раз одним электроном в каждом состоянии и что равномерное заполнение всех состояний отрицательной энергии является совершенно ненаблюдаемым для нас. Допустим далее, что какое-либо незанятое состояние отрицательной энергии, будучи отклонением от равномерности, наблюдаемо и как раз является позитроном.

Незанятое состояние отрицательной энергии, или дырка, как мы назовем его для краткости, будет обладать положительной энергией, так как оно является местом, где имеется недостаток отрицательной энергии. В самом деле, дырка ведет себя совершенно подобно обычной частице, и, отождествив ее с позитроном, мы наиболее разумным способом избавимся от трудности, связанной с появлением отрицательных энергий в наших уравнениях. С этой точки зрения позитрон является точно зеркальным изображением электрона, имеющим ту же массу, но противоположный заряд. Эти выводы были уже в общих чертах подтверждены экспериментом. Позитрон должен, кроме того, иметь такой же, как у электрона, спин, но это заключение не было еще проверено на опыте. На основании нашей теоретической картины мы должны ожидать, что обычный электрон положительной энергии может упасть в дырку и заполнить ее, причем освободившаяся энергия будет выделена в виде элект-

ромагнитного излучения. Это будет соответствовать процессу, в котором электрон и позитрон взаимно уничтожаются. Обратный процесс, а именно создание электрона и позитрона из электромагнитного излучения, тоже может иметь место. Эти процессы, по-видимому, были обнаружены экспериментально и в настоящее время исследуются более детально.

Теория электронов и позитронов, которую я только что набросал здесь, является логически замкнутой и согласуется со всеми известными экспериментальными фактами. Было бы желательно построить столь же удовлетворительную теорию и для протонов. Пожалуй, можно было бы предположить, что та же самая теория применима и к протонам. Это привело бы к возможности существования отрицательно заряженных протонов, являющихся зеркальным отображением обычных, положительно заряженных. Недавние экспериментальные результаты Штерна, касающиеся спинового магнитного момента протона, противоречат, однако, подобной теории протонов. Так как протон значительно тяжелее электрона, то вполне возможно, что для него требуется гораздо более сложная теория, хотя сейчас нельзя сказать, какой она должна быть.

Во всяком случае, я считаю вероятным существование отрицательных протонов, ибо поскольку мы можем еще опираться на теоретические выводы, между положительным и отрицательным электрическими зарядами имеется полная и совершенная симметрия, и если эта симметрия действительно носит фундаментальный характер, то должно оказаться возможным обращать заряд частиц любого сорта. Конечно, отрицательные протоны будет гораздо труднее обнаружить экспериментально, так как для этого необходима значительно большая энергия, соответствующая большей массе.

Если мы встанем на ту точку зрения, что полная симметрия между положительным и отрицательным электрическими зарядами является фундаментальным законом природы, то мы должны рассматривать как своего рода случайность, что Земля и, вероятно, вся Солнечная система содержат избыток обычных отрицательных электронов и положительных протонов. Вполне возможно, что некоторые звезды построены иным путем, а именно главным образом из позитронов и отрицательных протонов. Конечно, в мире должно быть одинаковое число звезд каждого сорта. Звезды обоих сортов будут иметь в точности одинаковые спектры, и в настоящее время нет возможности различить их какими-либо астрономическими методами.