

# Происхождение квантовой теории поля \*)

Я хочу рассказать о самом начале развития квантовой механики и квантовой теории поля. Мне хотелось бы, чтобы вы поняли, какое воодушевление и какие разочарования принесли эти дни молодому физику, жившему в то время.

**Боровские орбиты.** В 1923 году я появился к Кембридже в качестве аспиранта, и мне назначили в качестве научного руководителя Р. Г. Фаулера. Тогда я впервые в жизни услышал о боровских орбитах. Я был просто поражен тем, что о внутреннем строении атома известно так много и что можно реально использовать уравнения движения Ньютона для изучения поведения электронов в атоме. До этого я был студентом инженерного факультета Бристольского университета и ничего не знал об этой работе. Боровские орбиты произвели на меня огромное впечатление.

В те дни было множество серьезных проблем. Прежде всего, теория с успехом применялась лишь к тем задачам, в которых дело сводилось, по существу, к одному электрону. Но серьезные трудности возникали и при описании одного электрона. Главное, число состояний электрона оказалось вдвое больше того, которое следовало ожидать на основании теории, и это совершенно опрокидывало все построения, соединявшие электроны в атоме при попытках воспроизвести периодическую систему элементов.

Как можно было понять это удвоение числа состояний электрона? Спин электрона в то время не был известен, и предполагалось, что удвоение должно возникнуть из-за взаимодействия электронов между собой. Вернер Гейзенберг весьма серьезно занимался этим вопросом; он ввел специальный термин для этого удвоения, назвав его «Zweideutigkeit». Это слово можно перевести как «двузначность». Электрон в атоме, взаимодействуя с другими электронами, приобретал свойство двузначности, которое проявлялось как удвоение его состояний.

В то время уже появились люди, думавшие о спине электрона, но эта идея встретила с сильным противодействием. Одним из первых был Ральф де Лаер Крониг. Ему пришла в голову мысль, что помимо движения по орбите электрон может вращаться вокруг своей оси. Он работал тогда с Вольфгангом Паули и рассказал ему об этом. Паули сказал: «Нет, это совершенно невозможно», — и разгромил Кронига.

\*) The Origin of Quantum Field Theory // The Impact of Modern Scientific Ideas on Society.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1981.— P. 39—55.

Совершенно независимо та же идея пришла двум молодым голландским физикам, Джорджу Уленбеку и Самуэлю Гоудсмиту, которые работали в Лейдене у профессора Пауля Эренфеста. Они написали небольшую статью о спине электрона и показали ее Эренфесту. Идея очень понравилась Эренфесту. Он посоветовал Уленбеку и Гоудсмиту отправиться к Хендрику Лоренцу, который жил неподалеку, в Гарлеме, и поговорить с ним. Они поехали и поговорили. Лоренц сказал им: «Нет, у электрона не может быть спина. Я и сам об этом думал, но если бы электрон вращался, то скорость на его поверхности превышала бы скорость света. Так что из этого ничего не выйдет». Уленбек и Гоудсмит вернулись к Эренфесту и попросили отдать им обратно статью. «Поздно,— сказал Эренфест,— я уже отослал ее в печать».

Вот так увидела свет идея о спине электрона. Мы обязаны этим импульсивности Эренфеста и тому, что он не допускал, чтобы старшие относились к молодежи невнимательно. Идея о том, что электрон обладает двумя спиновыми состояниями, разрешила проблему двузначности.

Однако самым важным в то время было понять, как боровские орбиты взаимодействуют между собой. Рассмотрим атом гелия или любой другой атом с несколькими электронами. Каждый из этих электронов движется по своей орбите, и они должны влиять друг на друга. Как же описать такое взаимодействие? Это было главное, что занимало меня в то время, когда я был аспирантом в Кембридже, в 1923—1925 годах. Единственным путем представлялось использование гамильтоновых методов. Методы гамильтоновой механики оказались весьма успешными при работе с боровскими орбитами, и я считал, что необходимо некоторое развитие этих методов и гамильтоновой теории взаимодействия.

Следует упомянуть, что тогда шла работа и в другом направлении, не связанном с теорией боровских орбит. Первооткрывателем здесь был Альберт Эйнштейн. Еще в 1917 году он размышлял над взаимодействием атома с окружающим его электромагнитным полем, считая, что атом поглощает и испускает фотоны, и ввел некоторые коэффициенты для описания этого взаимодействия. Атом, находящийся в возбужденном состоянии, может испустить фотон и перейти в более низкое состояние, и этот процесс испускания описывается эйнштейновским коэффициентом  $A$ . Затем он ввел коэффициент  $B$  для описания процесса поглощения фотона, в котором атом из низшего состояния перепрыгивает в более высокое. Эйнштейн обнаружил, что для того чтобы было возможно равновесие, в котором излучение удовлетворяло бы закону Планка, должен существовать процесс вынужденного излучения. Если атом способен излучать и если на него падает излучение подходящей частоты, то излучение превысит спонтанное испускание на величину, которая также определяется коэффициентом  $B$ . Эйнштейн нашел соотношение между  $A$  и  $B$  из чисто статистических соображений, чтобы получить равновесие, соответствующее закону Планка.

Каждый из этих коэффициентов Эйнштейна связан сразу с дву-

мя состояниями атома. Они не имели никакого отношения к боровским орбитам. Физики, занимавшиеся боровскими орбитами, всегда оперировали величинами, отнесенными к одному состоянию. Введя свои коэффициенты, зависящие от двух состояний, Эйнштейн получил теорию, не зависящую от метода боровских орбит.

Макс Борн и Гейзенберг развили эту идею Эйнштейна и построили более общую теорию атома, взаимодействующего с излучением, — дисперсионную теорию. Она была полностью основана на коэффициентах Эйнштейна и не имела ничего общего с боровскими орбитами.

Я читал об этой работе, но она не произвела на меня большого впечатления, что было моей ошибкой. Я был увлечен боровскими орбитами и считал, что существенного прогресса в теории атома можно достичь, только поняв механизм взаимодействия между орбитами. В этом я был совершенно не прав.

**Механика Гейзенберга.** Окончательное решение было найдено Гейзенбергом в 1925 году, когда он построил новую матричную механику, теорию, основанную как раз на величинах, каждая из которых связана с двумя атомными состояниями, а не с одним. Позже эти величины стали называться матричными элементами. Эта теория была совершенно независима от боровских орбит.

Гейзенберг порвал с идеей боровских орбит и пришел к формулировке новой динамики. По существу, новая динамика была основана на новой алгебре, в которой произведение двух динамических переменных  $uv$  не совпадает с их произведением в другом порядке  $vu$ . Эта работа была для меня большим сюрпризом. Я внезапно осознал, что она дает ключ к прогрессу в теории атома. Она показала мне, до какой степени я был неправ, погрязнув в боровских орбитах, в то время как на самом деле необходима была новая математика, совершенно не похожая на прежнюю, которая и должна привести к совсем новым уравнениям.

Относительно нынешней ситуации в квантовой теории поля следует, по-моему, отдавать себе отчет в том, что она очень похожа на квантовую теорию до Гейзенберга. Физики заблуждаются, непрерывно пытаются развивать физические идеи, к которым они привыкли: это идеи, обычно выражаемые на языке диаграмм Фейнмана. Я полагаю, что полное доверие к диаграммам Фейнмана и попытки введения искусственных процедур перенормировок, чтобы обойти трудности, сродни той ошибке, которую совершал я в 1924—1925 годах, цепляясь за боровские орбиты. На самом деле нужна математика нового типа. Необходимы новые уравнения, которые выражали бы взаимодействие между основными величинами в физике; не следует упрямо придерживаться привычных идей, пытаться выехать на них.

Вот так началась квантовая механика. Для меня было потрясающим открытием увидеть, какую гигантскую силу получили физики, овладев некоммутативной алгеброй, к которой пришел (скорее, которую вынужден был принять) Гейзенберг. (Я думаю, что Гейзенбергу не хотелось допускать, что основной чертой нашей

динамики является некоммутативная алгебра, однако собственные идеи все же заставили его пойти в новом направлении.) Оказалось возможным развить эту новую механику таким образом, что она стала формально весьма близка к старой классической механике, выраженной в форме Гамильтона. Именно математика по существу доминировала в ходе развития новой теории. Правильное понимание физических соотношений, возникших из этой новой математики, пришло лишь через несколько лет. Прежде были найдены сами уравнения.

Выяснилось, что уравнения новой механики можно представить в таком виде, что они будут очень похожи на наиболее важные уравнения классической механики. Нужно лишь написать эти уравнения в гамильтоновой форме, а затем использовать общее соотношение, связывающее величину  $uv-vi$  в новой динамике со скобкой Пуассона для двух соответствующих переменных в классической теории.

**Волны Шрёдингера.** Я был очень увлечен всем происходящим и полностью погрузился в новые соотношения. А через несколько месяцев Эрвин Шрёдингер опубликовал свое волновое уравнение. Меня это вначале не очень заинтересовало, так как я верил, что все необходимое уже содержится в идеях Гейзенберга. Они дали основу, которую можно было неограниченно развивать, при этом не ощущалось необходимости в новом наборе фундаментальных идей, подобном тому, который ввел Шрёдингер. Шрёдингер использовал идею связи между волнами и частицами.

Следует упомянуть, что Луи де Бройлю первому пришла идея, что всякая частица связана с волной. Эйнштейн указал на связь между фотонами и световыми волнами. Он сделал это намного раньше, в 1905 году, а де Бройлю принадлежит обобщение на все частицы. Идея де Бройля родилась целиком из соображений математической красоты, которая возникает, когда уравнения представляются в релятивистской форме.

Де Бройль сформулировал свою теорию для отдельного свободного электрона, а Шрёдингер развил ее для описания электрона, движущегося в электромагнитном поле. Как только Шрёдингер нашел свое общее уравнение, он применил его к атому водорода. Полученный результат не согласовывался с экспериментом, так как Шрёдингер тогда не знал о спине электрона. Он был глубоко разочарован неудачей, о чем рассказывал мне через много лет. Шрёдингер решил, что сама идея волнового уравнения полностью неверна. Он был страшно расстроен и совсем забросил это дело. Когда прошло несколько месяцев и он немного оправился от депрессии, он смог вернуться к работе, посмотрел на нее заново и увидел, что если сделать нерелятивистское приближение (поскольку рассматривалась нерелятивистская система), то теория будет согласовываться с данными наблюдений. И тогда Шрёдингер опубликовал свое уравнение как нерелятивистское.

Вас может удивить, что первые работы Шрёдингера были полностью нерелятивистскими, хотя они исходили из идеи волн де

Бройля, а те, в свою очередь, строились на основе релятивистской теории. Именно таким непрямым путем все и происходило. Шрёдингеру не хватило смелости опубликовать уравнение, которое приводило к результатам, противоречившим опыту. Ему следовало бы на это решиться, и тогда именно он опубликовал бы уравнение второго порядка по  $d/dt$ , которое стало известно как уравнение Клейна — Гордона, хотя еще до Оскара Клейна и Вальтера Гордона оно было открыто Шрёдингером и было первым волновым уравнением, с которым он работал. Но Шрёдингеру хотелось публиковать лишь то, что не входило в прямое противоречие с данными наблюдений. В то время люди были довольно робкими, как мне кажется, и потому авторство на уравнение, которое сейчас принято для описания заряженной частицы без спина, осталось за Клейном и Гордоном.

Когда появилась теория Шрёдингера, она несколько раздражала меня, потому что мне не хотелось отвлекаться от развития идей Гейзенберга и от исследования аналогии между механикой Гейзенберга и механикой Ньютона. Я, конечно, был не прав в своей враждебности, ведь, как показал сам Шрёдингер, да и не только он, его теория по своим математическим следствиям эквивалентна теории Гейзенберга и вместе с тем позволяет понять физику с новой точки зрения. Теория Шрёдингера открыла новое направление исследования, которое нельзя было бы представить себе, оставаясь в рамках теории Гейзенберга.

Важнейшее новое направление, подсказанное теорией Шрёдингера, было связано с ее приложением к системам, состоящим из двух или нескольких частиц одинаковой природы. Стало возможным рассмотрение шрёдингеровской волновой функции, симметричной по двум частицам, или же, наоборот, антисимметричной волновой функции. Я сомневаюсь, чтобы эти идеи симметрии могли прийти кому-нибудь в голову на основе одной только гейзенберговской картины. Если же взять за основу картину Шрёдингера и добавить к ней некоторые идеи Гейзенберга, то соображения симметрии возникают довольно естественно.

Вскоре я обратил внимание на важность соображений, связанных с симметрией или антисимметрией, и принялся за их изучение. Я обнаружил, что если разрешить только симметричные состояния (это возможно, так как если начальное состояние было симметричным, то оно останется симметричным и в последующем), то получится теория системы, состоящей из нескольких одинаковых частиц, которая подчиняется статистике, отличной от классической. Такая новая статистика уже была предложена в 1924 году в работе Шатьендраната Бозе. Это произошло еще до великого открытия Гейзенберга.

Бозе интересовался только тем, как объяснить закон излучения Планка. Эйнштейн также много занимался этим вопросом. Основная проблема была логической: очевидно было, что классическая механика не применима к закону Планка, и надо было обходиться без заведомо неверной теории. Как же получить закон Планка без классической механики? Бозе придумал, как это сделать: надо

просто устроить так, чтобы полная энергия была распределена между различными возможными состояниями осцилляторов, представляющих собой электромагнитное поле, допустив, что вероятность любого числа степеней возбуждения для каждого осциллятора одинакова. Выполнив эту программу, можно получить закон Планка, не используя классической теории. Бозе послал свою работу Эйнштейну. Работа Эйнштейну очень понравилась, и он отослал ее в печать. Так появилась новая статистика Бозе. Как оказалось, квантовая механика при условии, что волновые функции симметричны относительно перестановок одинаковых частиц, как раз приводит к статистике Бозе для этих частиц.

Рассмотрим другой вид симметрии, возникающий при требовании, чтобы волновая функция была антисимметрична относительно перестановок одинаковых частиц. При этом условии в одном состоянии не может быть двух одинаковых частиц. Итак, требования рассмотренной симметрии необходимы для электронов.

Таким образом, у нас есть два вида статистики: статистика Бозе, которая применима к фотонам, и другой вид статистики, соответствующий антисимметричным волновым функциям и применимый к электронам. Об этом виде статистики писал Энрико Ферми, но я забыл о его статье, когда писал свою работу на эту тему, и не сослался в ней на Ферми. Ферми написал мне, указав, что он первый предложил статистику этого вида, и мне пришлось согласиться с ним и извиниться за то, что я забыл о его статье. Причина моей забывчивости была в том, что я интересовался только статьями, имевшими отношение к фундаментальным проблемам теории атома. Я прочитал работу Ферми, когда она была опубликована, но она вылетела у меня из головы. Я не обратил внимания на ее важность, так как она не имела отношения к основной проблеме того времени — к вопросу о том, как взаимодействуют боровские орбиты.

Так утвердилось представление о существовании частиц двух видов, бозонов и фермионов. Оказалось, что все известные частицы принадлежат к одному из этих двух видов. Я не знаю, есть ли для этого какая-нибудь очевидная причина, но так уж получилось. При таком развитии теории стало понятно, как при переходе от формулировки Гейзенберга к формулировке Шрёдингера возникают идеи, которые едва ли появились бы, если придерживаться только гейзенберговской формулировки и исходить из аналогии между квантовой и классической механикой.

Этот пример иллюстрирует, как мне кажется, довольно общий принцип в развитии теоретической физики: следует двигаться только в направлении, указанном математикой. На самом деле, именно математика наводит на мысль о симметричных и антисимметричных состояниях, и следует проследить за математической логикой и выяснить, к каким следствиям она приводит, даже если вы попадаете при этом в совершенно незнакомую область, далекую от того, с чего вы начали.

Я мог бы упомянуть и другие примеры, когда, по моему мнению, полезно довериться логике математических идей. Один из таких

примеров — математика, которая привела к предсказанию монополя. Это очень красивый математический подход, но до сих пор не получено доказательств, что он обладает какой бы то ни было ценностью с физической точки зрения. Может быть, в будущем он и окажется полезным. Это хороший пример того, как математика может повести нас в направлении, в котором мы не пошли бы, если бы следовали одним лишь физическим идеям.

Возвращаясь к симметричным и антисимметричным состояниям, заметим, что можно рассмотреть другие типы симметрии, допускаемые математикой. Подходя к этому вопросу с общей точки зрения, мы приходим к идее об операторах перестановок. У нас есть волновая функция, описывающая систему одинаковых частиц, и мы можем применить к ней оператор перестановки этих частиц. Все известные частицы таковы, что действие оператора перестановки приводит к возникновению знака плюс или минус: все частицы — бозоны или фермионы. Можно, однако, применить оператор перестановки не ко всем переменным, описывающим частицы, а лишь к некоторым из них. Например, если у частиц есть спин, то можно применить оператор перестановки лишь к координатам частиц, но не к спиновым переменным. С математической точки зрения это допустимо. Таким образом, мы можем получить некоторые новые операторы, являющиеся динамическими переменными в квантовой механике. Они возникают совершенно независимо от тех величин, которые существуют в рамках классической механики. Математика указывает нам новое направление, которое оказалось весьма полезным при описании атомов, содержащих несколько электронов. Оно позволило нам понять мультиплетную структуру спектров таких атомов.

Можно ввести другие динамические переменные, совершенно независимые от тех величин, которые существуют в классической теории. Эти динамические переменные должны быть такими, чтобы их можно было перемножать и получать новые переменные того же рода. Иными словами, такие переменные должны образовывать группу. Этим методом часто пользуются в настоящее время для описания внутренних свойств различных частиц. Вводят новые переменные, образующие некоторую группу. Задача состоит в том, чтобы определить правильную группу; общей теории на этот счет нет. Приходится пробовать различные возможности и сравнивать результаты с опытом. Во всех современных теориях частиц, возникающих в физике высоких энергий, используются динамические переменные, связанные с элементами некоторой группы. Здесь мы сталкиваемся с математическими продвижениями, совершенно независимыми от тех предположений, которые можно почерпнуть из классической механики.

**Теория излучения.** Итак, фундаментальные идеи квантовой механики были заложены, и надо было двигаться дальше. Я разработал теорию взаимодействия атомной системы с электромагнитным излучением, рассматривая это излучение как внешнее возмущение, которое приводит к переходам в атомной системе, и обнаружил, что при этих переходах система может поглощать или, наоборот, испус-

кать кванты энергии, перескакивая из одного состояния в другое. Это привело к теории, в которой появились эйнштейновские коэффициенты  $B$ , описывающие поглощение излучения и его вынужденное испускание. Это были первые коэффициенты, выведенные на основе новой механики. Однако метод оказался неподходящим для объяснения эйнштейновских коэффициентов  $A$ , описывающих спонтанное излучение.

Следует заметить, что коэффициент Эйнштейна для вынужденного излучения относился к эффекту, который был крайне мал, и в то время, когда он был предложен, его наблюдение казалось совершенно безнадежным делом. Со временем нашли способы усиления этого эффекта; теперь он лежит в основе теории лазеров и играет важнейшую роль. В сущности, идеей лазера мы обязаны работе Эйнштейна 1917 года.

В дальнейшем развитии квантовой механики Гейзенберга и Шрёдингера мне пришло в голову использовать процедуру, называемую вторичным квантованием. Нужно просто взять волновую функцию из теории Шрёдингера, т. е. волновую функцию  $\psi(q)$  ( $q$  — переменная, обозначающая точку в области определения волновой функции), и предположить, что все величины  $\psi(q)$  при различных значениях  $q$  являются не просто числами, а гейзенберговскими операторами. Затем надо взять сопряженные величины,  $\bar{\psi}(q)$ , и так же считать их операторами. Предполагается, что все  $\psi(q)$  коммутируют друг с другом, то же справедливо и для  $\bar{\psi}(q)$ , но  $\psi(q)$  не коммутирует с  $\bar{\psi}(q)$ . Эта идея показалась мне очень интересной, и я решил посмотреть, куда она приведет. Занявшись ею, я выяснил, что этот метод приводит к ансамблю одинаковых систем, удовлетворяющих статистике Бозе.

Я был несколько разочарован тем, что ничего по-настоящему нового не получилось. Вначале я думал, что это замечательная идея, и очень надеялся получить что-то действительно новое, а она оказалась всего лишь новым способом возвращения к ансамблю одинаковых систем, удовлетворяющих статистике Бозе.

И все же это позволило по-новому посмотреть на статистику Бозе, в частности, сосредоточить внимание на операторах  $\psi(q)$  и  $\bar{\psi}(q)$ . Они оказались операторами, которые повышают или уменьшают степень возбуждения одного из осцилляторов на один квант. Эти операторы испускания и поглощения стали затем наиболее полезными основными переменными для описания ансамблей бозонов.

Далее я перешел к рассмотрению ансамбля бозонов, взаимодействующих с некоторой внешней атомной системой, и результатом этого вычисления, проведенного стандартным методом теории возмущений, была теория взаимодействия фотонов с внешней системой, в которой один из фотонов может спонтанно испускаться. Эта теория вновь дала эйнштейновский коэффициент  $B$ , но, кроме того, и коэффициент  $A$ , описывающий спонтанное испускание. Таким образом, получилась полная теория излучения. Теперь вся теория Эйн-



штейна выводилась из квантовой механики. Нужно было только применить квантовую механику к ансамблю фотонов, взаимодействующих с какой-то внешней системой: атомом или чем-то в этом роде.

Вместо того чтобы работать с фотонами как с частицами, можно использовать компоненты электромагнитного поля. Таким образом достигается полное соответствие между волновой и корпускулярной теориями света. Можно считать, что свет состоит из электромагнитных волн, каждая из которых рассматривается как осциллятор, или же что свет состоит из фотонов, причем фотоны — бозоны, и каждое фотонное состояние соответствует одному из осцилляторов электромагнитного поля. Так волновая теория света объединяется с корпускулярной теорией. Это просто два способа математического описания одной физической реальности.

**Ансамбль фермионов.** Работа об испускании и поглощении излучения, о которой только что шла речь, вытекает из приложения метода вторичного квантования, соответствующего статистике Бозе. Вскоре после этого Паскуаль Иордан и Юджин Вигнер предложили другой метод вторичного квантования, применимый к системе фермионов. Этот метод был также основан на использовании операторов поглощения и испускания, но они описывали поглощение и испускание фермиона.

Два фермиона не могут находиться в одном состоянии, поэтому если мы возьмем оператор испускания фермиона и применим его дважды, то должны получить нуль. Обозначив этот оператор  $\eta$ , получим  $\eta^2=0$ . Аналогично, оператор поглощения, который будем обозначать  $\bar{\eta}$ , тоже обязательно даст нуль, если его применить дважды, т. е.  $\bar{\eta}^2=0$ . Может показаться несколько странным, что надо работать с величинами, квадрат которых равен нулю, но с математической точки зрения здесь нет ничего неверного.

Соотношения, связывающие  $\eta$  с  $\bar{\eta}$ , формально очень похожи на те, которые связывают операторы испускания и поглощения фотонов. Единственное различие состоит в знаке некоторых членов в уравнениях, выражающих основные коммутационные соотношения.

Когда я впервые услышал об этой работе Иордана и Вигнера, она мне не понравилась. Дело в том, что в случае бозонов наши операторы были тесно связаны с динамическими переменными, описывающими осцилляторы. Эти операторы имели классические аналоги. Для операторов Иордана — Вигнера классических аналогов не существовало вовсе, и они странно выглядели с классической точки зрения. Квадрат каждого из них равен нулю. Все это мне не нравилось. В действительности я был не прав, так как формализм для фермионов был столь же хорош, как и тот, который я разработал для бозонов.

Мне пришлось приспособиться к совершенно другому способу мышления. Не так уж важно, чтобы все величины имели классические аналоги. В чем мы действительно нуждаемся, так это в динамических переменных, удовлетворяющих коммутационным или ан-

тикоммутационным соотношениям, которые были бы самосогласованны. Используя такие динамические переменные, можно построить разумную квантовую теорию совершенно независимо от того, есть у нее классический аналог или нет. Если классический аналог есть, то тем лучше: тогда легче представить себе эти соотношения. Но если классического аналога нет, то все же вполне можно обойтись математикой. Несколько раз я серьезно ошибался в своих взглядах на развитие квантовой механики, и мне приходилось их пересматривать.

**Отрицательные энергии.** Другой проблемой, очень меня занимавшей, был вопрос об отрицательных энергиях, которые оказываются возможными в любой релятивистской теории. Формула Эйнштейна для энергии системы с данным импульсом включает квадратный корень, и в результате, с математической точки зрения, энергия может быть как положительной, так и отрицательной. Это было известно давно, с 1905 года, и в первое время никого не беспокоило, так как достаточно было предположить, что на начальной стадии нашего мира все частицы были в состояниях с положительными энергиями. Тогда они навсегда останутся с положительными энергиями, так как не смогут перескочить барьер, отделяющий положительные энергии от отрицательных. Таким образом, о состояниях с отрицательными энергиями можно было забыть.

С развитием квантовой теории ситуация изменилась, так как стало известно, что возможны скачки, переводящие систему с одного энергетического уровня на другой. Если существует частица в состоянии с положительной энергией, то она могла бы перескочить в состояние с отрицательной энергией.

Довольно долго эта проблема не очень беспокоила физиков просто потому, что были другие, более серьезные трудности. Существовали принципиальные трудности в понимании стабильности атомов, в описании взаимодействия электронов в атоме, в интерпретации спина — эти проблемы были главными, наиболее актуальными. Но постепенно эти трудности были разрешены одна за другой, и на первое место вышла принципиальная трудность, связанная с состояниями электронов с отрицательными энергиями.

Этот вопрос очень меня беспокоил. Он казался мне особенно важным потому, что я разрабатывал теорию преобразований в квантовой механике, теорию, которая позволяла преобразовывать волновые функции от одного набора коммутирующих переменных к функциям от другого набора, причем результат можно было использовать для вычисления вероятности любого набора коммутирующих переменных, имеющих конкретные значения. Эта теория мне очень нравилась, и мне казалось, что она должна остаться. В рамках этой теории необходимо было иметь волновое уравнение для электрона, линейное по  $\partial/\partial t$ . Однако такое линейное по  $\partial/\partial t$  уравнение противоречило бы принципу Эйнштейна, согласно которому время должно быть равноправно с координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Физики изучали немного бесспиновые электроны, которые описываются уравнением Клейна — Гордона. Это релятивистское урав-

нение, но его нельзя было интерпретировать в рамках моей общей теории преобразований в квантовой механике, и поэтому для меня оно оказалось неприемлемым. Другие физики, с которыми я разговаривал в то время, не были столь озабочены построением квантовой теории, которая согласовывалась бы с общей теорией преобразований, и потому склонны были скорее не обращать внимания на эту проблему. Но у меня она просто не выходила из головы. В конце концов я пришел к новому волновому уравнению, в котором волновая функция имела четыре компонента, и это волновое уравнение хорошо удовлетворяло требованию наличия спина у электрона. Оно давало правильный магнитный момент, а также значение углового момента, связанного со спином. Однако при этом возникла проблема состояний с отрицательной энергией. При наличии у волновой функции четырех компонент появляются удвоение, связанное с двумя компонентами спина, а также дополнительное удвоение, соответствующее состояниям с отрицательной энергией.

Тогда у меня возникла мысль, что раз отрицательных энергий нельзя избежать, их надо включить в теорию. Это можно сделать, представив себе вакуум по-новому. Предположим, что в вакууме все состояния с отрицательной энергией заполнены. Это возможно благодаря принципу Паули, согласно которому в каждом данном состоянии может быть не больше одного электрона. Таким образом, получается море электронов с отрицательной энергией, по электрону в каждом состоянии. Это бездонное море, но вас оно не должно беспокоить: представление о бездонном море, в сущности, не так уж непривлекательно. Просто надо рассматривать события, происходящие вблизи морской поверхности, причем над морем существуют электроны, которые не могут в него упасть, потому что в море для них нет места.

Однако существует возможность образования в море дырок. Такие дырки не обладали бы избытком энергии, так как для исчезновения дырки надо затратить отрицательную энергию. Кроме того, дырка должна двигаться так, как будто она обладает положительным зарядом. На самом деле это отсутствие отрицательного заряда, и в таком смысле дырка ведет себя как положительный заряд. В результате дырки проявляют себя как частицы с положительной энергией и положительным зарядом.

Когда у меня впервые возникла эта идея, я подумал, что должна существовать симметрия между дырками и обычными электронами, но единственными положительно заряженными частицами, известными в то время, были протоны, поэтому мне и показалось, что дырки должны быть протонами. Мне не хватило смелости предложить новый вид частиц. Пожалуй, тогда были основания полагать, что есть лишь две заряженные частицы — электрон и протон. Существует электричество двух видов, положительное и отрицательное, и нужно было по частице на каждый вид электричества. В те времена общественное мнение было решительно настроено против выдумываний новых частиц. Я, конечно, не осмелился на это и потому опубликовал свою работу как теорию электронов и протонов. Я пола-

гал, что разность между массами электронов и протонов может каким-то образом возникнуть в результате взаимодействия между электронами. Я отдавал себе, однако, отчет в огромных трудностях такого подхода, так как разность масс была очень велика.

Вскоре меня атаковали мои коллеги на том основании, что масса новых частиц, дырок, не должна отличаться от массы обычных электронов. Наиболее решительно выступил против меня в этом вопросе Герман Вейль. На самом деле он был математиком, и его не слишком беспокоила физическая реальность; основное значение для него имели математические симметрии. Он очень категорично заявил, что новые частицы, образованные этими дырками, должны иметь ту же массу, что электроны, и я принял его точку зрения.

Последствия этого известны. Новые частицы называли антиэлектронами, и через некоторое время они были открыты экспериментаторами. Первым из них был Карл Андерсон, один из выдающихся физиков, и мы должны благодарить его за это. Таким образом вопрос был решен.

**Бесконечности.** Было решено много проблем, но кое-какие серьезные трудности все же остались. Важнейшая из них состояла в том, что при попытках построения точной теории электронов, взаимодействующих с электромагнитным полем, возникает уравнение Шрёдингера, которое не решается. Его приходится решать стандартными методами теории возмущений, и когда доходят до членов второго порядка, возникают бесконечности. Единственный вывод, к которому можно было прийти, состоит в том, что уравнение не имеет решений. Это весьма фундаментальная трудность, которая выявилась довольно рано в теории квантовой электродинамики, и она до сих пор не преодолена.

Была предпринята большая работа, чтобы понять, как справиться с этой трудностью, мы еще поговорим об этом. Я не буду вдаваться в подробности, но хочу высказать свою точку зрения. Следует признать, что наша теория взаимодействия электромагнитного поля с электронами содержит нечто глубоко неправильное. Я имею в виду, что либо механика неверна, либо неправильно найдена сила взаимодействия. Неправильность этой теории почти так же серьезна, как неправильность теории боровских орбит.

Когда такой старый человек, как я, думает о проблемах современной физики высоких энергий, ему трудно не вспомнить ощущение неудовлетворенности, которое было у нас в догейзенберговский период. У нас были идеи, которые вполне хорошо работали вплоть до определенной точки, но, в сущности, все было неправильно. Думается, надо что-то изменить, и изменение должно быть столь же фундаментальным, как то, которое мы вынуждены были принять, когда отказались от боровских орбит. Нам нужна какая-то новая математика, столь же поразительная и непохожая на то, к чему мы привыкли, как некоммутативная алгебра Гейзенберга во времена, когда физики все еще работали с боровскими орбитами.

Я думал над этим вопросом много лет и считаю, что единственно правильный ответ может быть получен, если кому-нибудь удастся

придумать новую математику. В рамках той математики, которая используется сейчас, существуют серьезные ограничения. Одно из этих ограничений, которым я занимаюсь в последнее время (я думаю над этой проблемой уже довольно много лет), связано с природой наших основных уравнений.

**Основные уравнения.** Эти уравнения существуют в двух видах: уравнения движения в теории Гейзенберга и волновое уравнение Шрёдингера. Обычно полагают, что эти формы основных уравнений эквивалентны и можно свободно переходить от одной формы к другой, используя ту из них, которая больше подходит для рассматриваемой конкретной задачи. Для системы с конечным числом степеней свободы обе формулировки действительно эквивалентны, но это не так в случае квантовой электродинамики, где число степеней свободы бесконечно велико.

В квантовой электродинамике мы имеем дело с гейзенберговскими динамическими переменными, которые, как и для систем с конечным числом степеней свободы, могут быть представлены как операторы в гильбертовом пространстве. Гильбертово пространство похоже на евклидово пространство  $n$  измерений, где  $n$  стремится к бесконечности. (Гильбертово пространство можно описать в терминах непрерывных переменных или производить множество преобразований, но это для нас сейчас несущественно.) Это пространство с бесконечным числом измерений, но такая бесконечность в математике называется счетной бесконечностью. Можно перечислить все измерения, сопоставив их целым числам, и при этом ни одно не будет пропущено.

Далее, волновая функция Шрёдингера является вектором в гильбертовом пространстве, если она описывает динамическую систему с конечным числом степеней свободы. Другое дело в квантовой электродинамике. Здесь волновая функция Шрёдингера представляет собой вектор в пространстве, число измерений в котором гораздо больше, чем в гильбертовом пространстве. Грубо говоря, здесь необходимое число измерений стремится к бесконечности как  $2^n$ , где  $n$  — счетная бесконечность.

Вы можете сами убедиться в том, что это огромное число измерений действительно возникает. Возьмем все возможные состояния для одного из электронов и сопоставим их целым числам. Но каждое из этих состояний может содержать один электрон или не содержать ни одного электрона. Таким образом, для каждого из состояний есть две возможности. Полное число возможностей равно  $2$  в степени, равной числу состояний, т. е.  $2$  в степени, соответствующей счетной бесконечности. А при таком числе измерений пространство будет гораздо больше, чем пространство Гильберта.

Волновая функция Шрёдингера в квантовой электродинамике — это не вектор в гильбертовом пространстве, а нечто гораздо более сложное. Если мы имеем дело с гейзенберговой картиной, мы можем придерживаться гильбертова пространства и использовать соответствующие операторы, производя все математические выкладки в этих рамках. Если же мы хотим перейти к волновым функциям

Шрёдингера, то нам нужно пространство гораздо большего числа измерений. Думаю, что это должно быть пространство спиноров в гильбертовом пространстве. Я немного поработал в этой области и написал небольшую книжку о спиорах. Возможно, что спиноры в гильбертовом пространстве представляют собой основные математические величины, нужные для описания состояний в квантовой электродинамике.

Во всяком случае, эти непростые величины нового типа возникают в таких задачах, как вычисление переходов вакуум — вакуум с помощью диаграмм Фейнмана. Переходы вакуум — вакуум следует учитывать в картине Шрёдингера, но они не существенны с физической точки зрения и значительно усложняют вычисления. Поэтому я полагаю, что необходимо оставаться в рамках картины Гейзенберга, в которой переходы вакуум — вакуум вообще не появляются, и мы можем работать с математическими уравнениями в гильбертовом пространстве. Я потратил немало времени, пытаясь найти правильные уравнения и теперь довольно твердо убежден, что правильные основные уравнения еще не открыты.

Нужные новые релятивистские уравнения: следует ввести новые виды взаимодействий. Когда эти новые уравнения и новые взаимодействия будут придуманы, тревожащие нас в настоящее время вопросы автоматически разрешатся и отпадет необходимость в использовании таких нелогичных процедур, как бесконечные перенормировки. С физической точки зрения, эти процедуры совершенно бессмысленны, я всегда возражал против этого. В таком подходе результаты получаются, так сказать, на глазок.

Несмотря на успехи подхода, надо быть готовым полностью отказаться от него, а все достижения, к которым мы пришли, используя обычные формы квантовой электродинамики с устраняемыми искусственно бесконечностями, следует рассматривать как случайные правильные результаты, в точности так же, как успехи теории Бора считались случайными, когда результаты получались правильными.