

Развитие физических представлений о Природе*)

Развитие физики в прошлом представляется как непрерывный процесс, состоящий из множества мелких шагов, на который наложилось несколько больших скачков. Разумеется, именно эти скачки и представляют собой наиболее интересные особенности в развитии науки. Фоновый процесс постепенного развития кажется вполне логичным: люди разрабатывают стандартными методами определенные идеи, которые вытекают из достигнутого уровня развития. Но вот возникает большой скачок, и это означает, что появилось нечто совершенно новое.

Такие большие скачки сводятся обычно к преодолению предрассудков. Некое представление может существовать у нас с незапамятных времен; оно полностью принято и не возбуждает вопросов, так как кажется очевидным. И вот какой-нибудь физик обнаруживает сомнение, он стремится к тому, чтобы заменить предрассудки чем-то более точным, и это приводит к новому представлению о Природе.

Один из лучших примеров такого скачка — специальная теория относительности, которая показала, что мы должны отказаться от представления об абсолютности понятия одновременности. Раньше физикам казалось очевидным, что если два события происходят одновременно, то этому можно придать точное значение, абсолютный смысл. Но когда стали производить точные эксперименты с распространением света, принимающие во внимание конечность его скорости, оказалось, что эту мысль надо отбросить. Эйнштейн первым реально осознал необходимость избавиться от понятия абсолютной одновременности и заменить его новой картиной мира, в которой время выступает как четвертое измерение, а пространство и время рассматриваются в их единстве и могут быть подвергнуты преобразованиям, при которых может измениться направление временной оси. Это было очень большим шагом вперед, который привел к необходимости переформулировать практически все основания физики.

Мы уже привыкли к использованию векторов и тензоров в трехмерном пространстве. Тензор — вполне определенное физическое понятие, а математически он может быть описан лишь заданием его

*) Development of the Physicist's Conception of Nature // The Physicist's Conception of Nature/Ed. by J. Mehra.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1973.— P. 1—14.

компонент, отнесенных к некоторой системе координат. Тензор обладает тем свойством, что его компоненты линейно преобразуются при переходе к иной системе координат. Однако мы можем считать, что тензор существует совершенно независимо от систем координат. Это просто некий объект, погруженный в пространство, для математического описания которого нужны координаты.

С возникновением специальной теории относительности все наши векторы и тензоры в трехмерном пространстве пришлось заменить соответствующими величинами в четырех измерениях пространства-времени. Эти величины должны теперь иметь больше компонент. Например, вектор, который раньше относили к трехмерному пространству и для задания которого нужно было три компоненты, теперь оказывается погруженным в четырехмерное пространство-время и задается четырьмя компонентами. И все физические понятия пришлось изменить аналогичным образом.

Если речь идет об импульсе в трехмерном пространстве, то и ему надо придать четвертую компоненту, которая является просто энергией. Прежде мы имели закон сохранения импульса и закон сохранения энергии, и оба они были независимы. Теперь же эти законы оказались объединенными. Появилось единое понятие энергии-импульса, и единый закон сохранения относится к этому понятию в целом.

Теперь можно рассмотреть более сложные величины. Например, тензор напряжений, заданный в трехмерном пространстве, должен быть дополнен в специальной теории относительности рядом новых компонент, которые имеют смысл скорости потока импульса и энергии.

Некая проблема возникла в связи с угловым моментом. В обычном трехмерном пространстве угловой момент — это вектор, но его надо считать аксиальным вектором, преобразующимся как векторное произведение двух обычных векторов. При переходе к четырем измерениям такой вектор образует часть тензора второго ранга, антисимметричного относительно перестановки его индексов. Таким образом, возникает необходимость добавить еще три компоненты, и встает вопрос, что это за компоненты. Сам по себе угловой момент является весьма важным понятием, а дополнительные компоненты, необходимые для четырехмерного описания, оказались не столь фундаментальными, так как они относятся к моментам вращения относительно осей в пространстве-времени, которые зависят от времени. Закон сохранения углового момента играет важнейшую роль в нерелятивистской теории. Дополнительные три компоненты также сохраняются, но из-за их зависимости от времени это несущественно. Важные приложения углового момента относятся лишь к нерелятивистской ситуации, когда некоторая особая временная ось выделена явно.

Мы обсуждаем изменения, связанные со специальной теорией относительности, которые обусловлены отказом от ложной абсолютизации понятия времени. Новое измерение, возникающее при переходе к общей теории относительности, имеет до некоторой степени

сходный характер. Здесь надо было преодолеть тот предрассудок, что физический мир описывается с помощью пространства Евклида. Конечно, аксиомы Евклида, сформулированные много сотен лет назад, вполне хороши, если мы просто готовы принять их и вывести из них всевозможные следствия, построив таким образом евклидову геометрию. Вопрос, однако, состоит в том, действительно ли эти аксиомы применимы к расстояниям, измеряемым физиками. Всегда считалось, что это правильно, так как наблюдения показывают, что аксиомы применимы, по крайней мере, с очень хорошей точностью, и потому возник предрассудок, что эта точность абсолютна.

Оказалось, что и этот предрассудок надо отбросить. Расстояния, измеряемые физиками, не вполне соответствуют евклидовой геометрии. Как мы узнали об этом? Расхождения исключительно малы, слишком малы, чтобы их можно было обнаружить прямым наблюдением. Возможно, когда-либо в будущем, если люди смогут производить наблюдения с гораздо более высокой точностью, можно будет прямо показать отличие геометрии нашего мира от евклидовой геометрии, пока же это отличие обнаруживается косвенно.

Отклонение от евклидовой геометрии основано на предположении, что физическое пространство изображается как искривленное пространство, погруженное в пространство более высокой размерности. Этот путь также был предложен Эйнштейном, которого побудила к этому необходимость сочетать теорию относительности с тяготением. Ньютон предположил, что все тела притягиваются с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, но этот закон подвергался критике на том основании, что он требовал дальнего действия. Философы говорят, что тело не может оказывать действия там, где его нет, поэтому закон Ньютона содержит в себе что-то неверное. Однако такая критика не обоснована, так как можно ввести понятие поля.

Физики понимают под полем некоторую величину, отнесенную ко всем точкам пространства и изменяющуюся, как правило, непрерывно от точки к точке. Оказалось, что закон всемирного тяготения Ньютона можно переформулировать на языке поля, введя ньютонов потенциал, а при таком полевом подходе отпадает необходимость в концепции дальнего действия. Можно считать, что частица движется лишь под действием поля в непосредственной близости от нее.

Такая полевая формулировка удовлетворительна для философов, но с точки зрения физика дальнее действие или действие через поле — вполне эквивалентные формулировки, коль скоро от одного к другому можно перейти путем математического преобразования, а в приложении к примерам оба подхода всегда дают одни и те же результаты. Есть, однако, другие соображения, по которым полевая формулировка предпочтительна.

Перейдем к рассмотрению электродинамики. Первоначально ее основные законы, такие, как закон Кулона, были основаны на дальнем действии. Однако они были не вполне точны, и потребовалась их переформулировка. Модифицированные законы были ука-

заны Максвеллом; они были основаны на полевом подходе, который привел к возможности электромагнитных волн. Выяснилось, что дальнейшее продвижение возможно лишь в полевом подходе, а не в теории дальнего действия, и потому поля предпочтительнее.

Оказалось, что полевой подход необходим и при описании тяготения, в соответствии с общей теорией относительности Эйнштейна. Были установлены новые уравнения, в которые вошли полевые величины, причем один ньютонов потенциал был заменен десятикомпонентным полем. Впрочем, я не собираюсь излагать здесь детали.

Таким образом, наши представления о пространстве претерпели большие изменения. Прежде всего, мы перешли от трех измерений к четырем. Затем появилась идея введения в пространство кривизны, которая привела к представлению о том, что наше пространство является римановым. Иногда возникает вопрос: должны ли остановиться на этой стадии процесс изменения физических представлений о природе пространства. Электромагнитное поле во многих отношениях похоже на гравитационное. И то, и другое приводит к дальнедействующим силам, и это отличает их от других физических полей, используемых в атомной физике.

Некоторые предполагали, что между этими полями должно быть единство, и так как Эйнштейн показал, что гравитационные поля имеют геометрический смысл, это наводит на мысль, что и электромагнитное поле как-то связано с геометрией. В таком случае понадобится какая-то геометрическая схема, более общая, чем риманова геометрия, положенная в основу теории тяготения Эйнштейна. В этом направлении была проделана большая работа, но результаты пока неудовлетворительны. Я не хочу ссылаться на неудачные попытки развития физических идей и буду придерживаться лишь тех проблем, в решении которых удалось достичь успеха. При этих условиях следует придерживаться эйнштейновского взгляда на пространство и считать его четырехмерным римановым пространством, которое является основным для физики и вмещает в себя все физические процессы.

Итак, мы коснулись одного из направлений в развитии физических представлений. Другим важным достижением недавнего времени была квантовая теория, т. е. теория атомной структуры.

Переходя к этому вопросу, я подумал, что название моей лекции не совсем удачно. Оно как бы подразумевает, что все физики одинаково смотрят на развитие представлений о Природе. Но по отношению к квантовой теории это не вполне верно. В этом случае новые понятия не так легко объяснить, как в случае теории относительности. Здесь они менее прозрачны, и вопрос о том, что именно наиболее важно, какие понятия являются наиболее фундаментальными, решается разными физиками по-разному. С этой точки зрения, мою лекцию лучше было бы озаглавить «Развитие представлений физика о Природе». Я изложу свои собственные взгляды, и должен сразу же заметить, что вовсе не претендую на то, чтобы эти взгляды считались единственно разумными. Допустимы и другие

подходы, и в их пользу также можно привести определенные доводы. Я предпочитаю свой подход, потому что лично для меня он оказался наиболее успешным.

К развитию квантовой теории привело несколько крупных шагов. Первым шагом было, конечно, введение Планком конечного кванта энергии при описании электромагнитного поля. Это было нелегко принять, и физикам пришлось согласиться на это только под давлением экспериментальных данных. Затем пришлось подумать о том, что делать с массой спектроскопических данных. Они казались совершенно беспорядочными, пока не было найдено комбинационное правило Ритца для спектральных линий, согласно которому частота каждой спектральной линии выражается в виде разности двух членов. Вначале это было просто удачным приемом и не приводило к теории до тех пор, пока Бор не построил свою модель атома. Модель Бора была, пожалуй, важнейшим шагом в развитии атомной теории, ибо она показала, что законы классической механики становятся применимыми внутри атома для описания электронов, движущихся по внутриатомным орбитам, если добавить некоторые дополнительные условия и сделать определенные предположения. Предположения состояли в том, что надо пренебречь радиационным затуханием, а дополнительным условием было квантовое соотношение, которое фиксировало стационарные боровские состояния. Это стало действительно громадным продвижением на пути к созданию физической картины мира, может быть, слишком большим, чтобы считать его просто преодолением существовавших предрассудков.

После введения стационарных боровских состояний дальнейшее развитие физики указало на необходимость введения величин, связанных с двумя состояниями одновременно. Комбинационное правило Ритца, которое привело к квантовому условию Бора, показало, что частоты спектральных линий связаны каждая с двумя состояниями. Эйнштейн ввел коэффициенты испускания и поглощения, каждый из которых также был связан с двумя состояниями. Так возникла идея, что надо работать с величинами, отнесенными к двум состояниям. Была важная дисперсионная формула Крамерса — Гейзенберга, построенная целиком из величин, зависящих от двух состояний.

Все это привело Гейзенберга к его великолепному шагу вперед, положившему начало новой квантовой механике. Идея Гейзенберга состояла в том, что теорию надо строить полностью в терминах величин, отнесенных сразу к двум состояниям. Такие величины можно записывать в виде матричной таблички и рассматривать сразу всю числовую матрицу. Важнейшим достижением Гейзенберга было не только введение всех этих матричных элементов, но и понимание того, что вся матрица в целом соответствует одной динамической переменной.

В результате оказалось, что динамические переменные подчиняются алгебре, подобной алгебре матриц, в которой можно производить операции сложения и умножения, но умножение, вообще

говоря, некоммутативно: ab обычно не равно ba . Итак, приходится работать с величинами, подчиняющимися алгебре этого типа.

Сначала, когда я впервые увидел оригинальную статью Гейзенберга, в которой впервые были выдвинуты эти идеи, мне казалось, что важнее всего то, что приходится работать с динамическими переменными, удовлетворяющими некоммутативной алгебре. Я ввел новое название для таких динамических переменных: назвал их q -числами, в отличие от обыкновенных математических чисел, которые я называл c -числами *). Эти q -числа стали новым понятием, к которому физикам пришлось привыкать. Они заняли место динамических переменных, с которыми физики имели дело прежде, и для них оказалась справедливой новая алгебра. Вначале q -числа казались мне чем-то совершенно таинственным. Я делал относительно них некоторые предположения, просто для того чтобы продвинуть теорию вперед и использовать ее для примеров, и часто эти предположения были неверны. И все же понятие о q -числах получило дальнейшее развитие.

В первое время математическая природа q -числа была для меня загадкой. Было ясно, однако, в связи с формализмом Гейзенберга, что q -числа иногда можно заменить матрицами. Позднее выяснилось, что q -числа можно всегда заменять матрицами. Как теперь говорят, они имеют матричное представление. Однако существуют различные матричные представления. Матрицу следует рассматривать как набор компонент q -числа в том же смысле, как набор тензорных компонент задает тензорную величину. Можно считать, что тензор существует независимо от какой-либо определенной системы координат; точно так же и q -число существует независимо от какой-либо заданной системы матриц.

Когда стало ясно, что q -число всегда можно представлять в виде матриц, в их математической природе не осталось, конечно, ничего таинственного. С их помощью можно было выяснить все что угодно, и я смог исправить свои ранние ошибки. Сущность q -числа свелась к тому, что это нечто, имеющее физический смысл, независимый от матричного представления, и, таким образом, эту величину можно рассматривать с той же точки зрения, что и тензор.

Ранние работы с q -числами состояли просто в алгебраических преобразованиях, использующих заданную некоммутативную алгебру, и, конечно, интерпретация результатов таких действий оставалась неясной. Об интерпретации приходилось лишь догадываться, используя простые примеры. Отыскивали определенную интерпретацию, дающую правильный ответ, и эту интерпретацию обобщали и надстраивали в соответствующем направлении.

Новое достижение сыграло важнейшую роль в создании общей интерпретации квантовой механики. Этот шаг был сделан Шрёдингером, развившим идеи де Бройля. При этом в физике появилось новое понятие — состояние атомной системы.

*) См. статью этого сборника «Воспоминания о необычайной эпохе». — Примеч. пер.

Представление о состояниях существовало уже в классической механике. Классическая система может быть в различных динамических состояниях, соответствующих различным решениям уравнений движения. Интересно, однако, что квантовое состояние не просто соответствует классическому состоянию. Оно соответствует целому набору классических состояний, связанных друг с другом особым математическим способом, который был открыт Гамильтоном за сто лет до того времени. Такая особая связь между классическими состояниями была обнаружена Гамильтоном просто из соображений математической красоты, в попытке найти удобную форму динамических уравнений. И эта работа Гамильтона оказалась именно тем, что было нужно для подготовки к правильному пониманию квантовых состояний. Каждое квантовое состояние отвечает одному из гамильтоновых семейств классических состояний.

Было сделано поразительное открытие: между квантовыми состояниями существуют соотношения типа суперпозиции. Это значит, что состояния можно представлять в виде некоторых векторов. Состояния — это нечто такое, что можно складывать друг с другом и получать величины той же природы. Строго говоря, квантовое состояние соответствует не одному вектору такого типа, а некоторому направлению в векторном пространстве, но это уже не столь существенно. Векторы, соответствующие физическим состояниям в квантовой теории, обычно принадлежат пространству с бесконечным числом измерений, и при некоторых подходящих условиях сходимости это пространство является гильбертовым.

Здесь мы имеем дело с векторами нового типа, которые приобрели в физике большое значение. Когда какое-то новое понятие становится важным, мне нравится вводить для него новое имя, как, например, было в случае q -чисел. Для состояний я ввел название «кет-вектор». Здесь едва ли стоит объяснять причину, по которой я выбрал это название *). Итак, кет-векторы соответствуют физическим состояниям, и существует связь между кет-векторами и q -числами. Кет-вектор можно умножить на q -число, и получится другой кет-вектор. Можно сказать, что каждое q -число — это некоторый линейный оператор, действующий в пространстве кет-векторов. Физикам пришлось сжиться с этими новыми понятиями — q -числами и кет-векторами.

Напомню, что q -числа представляются матрицами. Каждому данному представлению q -чисел отвечает некое представление кет-векторов, каждый из которых задается набором координат. Обычно эти координаты называют волновой функцией. Это название объясняется тем, что в первых примерах, рассмотренных Шрёдингером, координаты кет-вектора образовывали волновую функцию в трехмерном пространстве, когда теория применялась к отдельной частице и использовалось подходящее представление. Теперь волновой

*) Это вторая половина английского слова bracket (скобка). Первая половина была использована Дираком для обозначения сопряженного состояния. — *Примеч. пер.*

функцией называют вообще компоненты кет-вектора в любой системе координат, даже если результат вовсе не связан с волнами.

Так волны были введены в квантовую теорию. Волны — это способ задания физических состояний. Теперь некоторые физики склонны полагать, что в атомной теории волны — более фундаментальный объект, чем частицы. Лично я не придерживаюсь этой точки зрения. Описывая физические объекты на языке волн, можно продвинуться довольно далеко, но я не думаю, что весь путь будет удобно пройти таким образом. Картина, которую я представляю вам здесь, нравится мне больше: переменные, связанные с частицами, являются q -числами, частицы могут пребывать в различных состояниях, а состояния описываются волновыми функциями.

В рамках этих представлений можно получить плодотворную физическую интерпретацию квантовой механики. У нас есть общие правила вычисления вероятностей того, что данные динамические переменные принимают определенные значения в заданном состоянии.

При этом очень важно то, что вычисляются именно вероятности; мы не вычисляем чего-то такого, что заведомо случится при заданных начальных условиях. Это значит, что мы приняли статистическую интерпретацию. Детерминизма классической механики больше не существует. Это еще одно из представлений, к которым пришлось привыкнуть физикам. Пришлось отказаться от предрассудка, что детерминизм необходим, а это было очень нелегко. Некоторые надеялись вновь ввести детерминизм тем или иным способом, добавляя скрытые переменные или как-то иначе, но из этого ничего не вышло в рамках тех идей; которые были приняты. Я мог бы еще добавить, что все еще сохранил предвзятое отношение к индетерминизму в основах физики. Однако мне пришлось примириться с этим, так как в настоящее время ничего лучшего у нас нет. Может быть, какое-то достижение в будущем и поможет нам вернуть детерминизм, но только за счет утраты чего-нибудь другого, путем отказа от какого-то иного предрассудка, которого мы пока еще твердо придерживаемся в настоящее время.

Однако стоит ли строить предположения о том, что может принести с собой будущее? Я просто хотел бы отметить, что если вам неуютно жить в мире, где нет детерминизма, то вы не одиноки в этом. Это ощущение разделяют многие, и я в том числе. Шрёдингер и Эйнштейн долго возражали против индетерминизма. И все же следует признать, что это лучшее, что у нас есть на данном этапе развития науки.

Введение кет-векторов (или волновых функций) привело к дальнейшему развитию теории, которое позволило применить ее к произвольному числу одинаковых частиц. Для такой системы волновая функция будет зависеть от переменных, относящихся ко всем этим частицам, и можно будет считать, что волновая функция симметрична относительно перестановки этих частиц. Если история мира началась с состояния, симметричного относительно одинаковых частиц, то состояние мира так и останется симметричным на-

вечно, и мы сможем сформулировать закон, согласно которому в Природе встречаются только симметричные волновые функции. Это закон Природы совсем нового типа, совершенно независимый от того, к чему мы привыкли в классической теории, и его установление нельзя рассматривать как преодоление какого-то пред-рассудка.

Другая возможность состоит в предположении, что в Природе встречаются только полностью антисимметричные волновые функции.

По всей видимости, Природа именно так и устроена. Есть частицы, описываемые лишь симметричными волновыми функциями, они называются бозонами. Для других частиц волновые функции всегда антисимметричны, они называются фермионами.

Теперь я хочу вернуться к понятию q -чисел и сказать кое-что о том, как можно обобщить это понятие. Вначале q -числа были введены как аналоги динамических переменных классической механики. Для работы с ними необходимо знать соответствующие коммутационные соотношения. Если дано, что ab не равно ba , то нужно еще знать, чему равна разность $ab - ba$. Нетрудно догадаться, что это за величина для тех систем, у которых есть классические аналоги: это скобка Пуассона. Установив эту связь, мы видим, что квантовая теория является некоторым обобщением классической. Для данной классической системы, содержащей определенные частицы, которые определенным образом взаимодействуют, можно указать соответствующую квантовую систему.

Можно обобщить и понятие q -числа, распространив его на любые линейные операторы, действующие на кет-векторы. Так можно ввести q -числа, не имеющие аналогов в классической механике, существенно увеличив тем самым возможности квантового формализма.

Могу привести один пример. Рассмотрим волновую функцию, описывающую n одинаковых частиц. Она должна зависеть от переменных q_1, q_2, \dots, q_n , где символ q относится ко всей совокупности переменных, необходимых для описания одной частицы. К этой волновой функции можно применить оператор, переставляющий между собой какие-либо переменные, например, оператор перестановки q_1 и q_2 . Каждый из таких операторов перестановки можно рассматривать как особое q -число, удовлетворяющее таким же уравнениям движения, как и все остальные динамические переменные в теории Гейзенберга. Такое q -число будет совершенно отлично от динамических переменных классической теории. Оно не имеет классического аналога.

Если мы применим эту теорию к волновым функциям, симметричным по динамическим переменным, то любой оператор перестановки будет равен 1. Следовательно, мы имеем дело с q -числом, которое всегда равно 1, и это не очень интересно. Аналогично, применяя операторы перестановки к антисимметричным волновым функциям, мы будем получать $+1$ или -1 , в зависимости от того, является перестановка четной или нечетной, и это тоже не очень интересно. Интересные результаты можно получить, рассматривая операторы

перестановок более общего вида. Предположим, что у частиц имеется спин. Тогда мы можем рассмотреть операторы, переставляющие только пространственные координаты частиц, но не их спины. Такие операторы уже не всегда равны ± 1 , ситуация должна быть сложнее. Можно построить теорию этих операторов перестановок, рассматривая их как динамические переменные, и получить интересные результаты.

Итак, можно обобщить понятие q -числа и ввести такие динамические переменные, которые не имеют классических аналогов.

Другое развитие теории, которое мне хотелось бы упомянуть, связано с введением операторов, меняющих число частиц. Число частиц можно увеличить или уменьшить на единицу; соответственно вводятся операторы испускания и поглощения. Как и q -числа, о которых шла речь выше, такие операторы могут быть введены в стандартную теорию, и они удовлетворяют тем же уравнениям движения. Введение этих операторов позволяет использовать формализм, в котором число частиц может меняться. В классической теории у нас не было этой возможности, однако такая модификация квантовой теории не вызывает затруднений.

Сказанное выше демонстрирует развитие квантовой механики и показывает, что это действительно весьма мощная и прекрасно работающая теория. У нее есть лишь один серьезный недостаток: это нерелятивистская теория. Мы все время придерживаемся исходных гейзенберговских уравнений движения, в которые входит $\partial/\partial t$, производная по некоторой выделенной временной переменной, а это противоречит духу относительности. Здесь шла речь о двух достижениях физики: теории относительности и квантовой механике. Как же их совместить? Физика должна быть единой. Мы должны иметь единственную теорию, согласную как с принципами теории относительности, так и с принципами квантовой теории. Как построить такую теорию?

Возьмем простой пример, рассмотрим одну частицу. Для нее можно построить волновое уравнение, волновая функция будет зависеть от координат x, y, z , и если мы будем рассматривать ее зависимость от времени, то t также войдет в число аргументов. Такая волновая функция будет функцией четырех аргументов, и ее можно рассматривать с релятивистской точки зрения, считая, что переменные задают точку в пространстве-времени. Для такой волновой функции уже можно попытаться установить релятивистское волновое уравнение, не противоречащее принципам квантовой механики. Оказалось, что это действительно можно сделать, причем удивительно (я был просто поражен, когда это впервые выяснилось), что простейшее решение этой задачи соответствует не бесспиновой частице, а частице, спин которой равен половине кванта действия. Очевидно, спин, равный половине кванта, играет в Природе особую роль, и для частиц с таким спином можно построить релятивистскую квантовую теорию, удовлетворяющую всем требованиям как специальной теории относительности, так и квантовой теории.

Пришлось ввести спин, равный половине кванта действия. Это

еще одно новое понятие, к которому физикам пришлось привыкнуть и для описания которого надо использовать спиноры — величины, являющиеся особым обобщением тензоров. Тензор — это нечто, погруженное в пространство (или пространство-время), и на компоненты тензора действуют операторы вращения. Спинор же — это такая величина, которая при повороте координатных осей на 360° меняет знак на обратный, а не возвращается к первоначальному значению, как тензор. С математической точки зрения такие величины вполне допустимы, это величины, меняющие знак при полном повороте вокруг любой оси в пространстве. Именно величины такого рода нужно было ввести для описания полуцелого спина.

То, что спин, равный половине кванта действия, естественно возник в релятивистском волновом уравнении, оказалось очень полезным, потому что многие элементарные частицы, известные в Природе, обладают именно таким спином, в частности электрон и протон. Таким образом, эта теория специально создана для электрона.

Однако здесь с самого начала возникла трудность; если применять обычные правила интерпретации волновой функции, то оказывается, что теория допускает состояния как с положительной, так и с отрицательной энергией. Вначале это обстоятельство послужило камнем преткновения, но потом оказалось, что возникшую трудность можно преодолеть очень красивым образом, изменив представления о вакууме.

Ранее физики всегда считали, что вакуум — это область пространства, в которой совсем ничего нет, но такое представление оказалось предрассудком, который пришлось отбросить. Лучше определить вакуум как состояние с низшей энергией. Если возможны электроны с отрицательными энергиями, то нам надо иметь как можно больше таких электронов, чтобы получить состояние с минимальной энергией. В то же время электроны удовлетворяют статистике Ферми, соответствующей антисимметричным волновым функциям. Для них справедлив принцип запрета Паули, означающий, что в любом состоянии может быть не более одного электрона. Таким образом, мы приходим к выводу, что состояние с низшей энергией для данной области пространства получается, если все электронные уровни с отрицательными энергиями заняты электронами. Это соответствует максимально возможному числу электронов с отрицательными энергиями.

Такая картина вакуума вполне разумна, если отказаться от предрассудка, что вакуум не должен ничего содержать, и этот подход оказался правильным. Он позволил строить состояния, отклоняющиеся от вакуума в двух направлениях: можно иметь либо электроны с положительными энергиями, либо свободные места на электронных уровнях с отрицательными энергиями. Подобные дырки среди состояний с отрицательными энергиями проявляют себя как частицы с положительными энергиями и положительным зарядом, которые позднее стали интерпретироваться как позитроны.

С новой картиной вакуума появилась возможность рождения материи из поля излучения. Если электрон перепрыгивает из состоя-

ния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией, то возникают обыкновенный электрон и позитрон, и энергия, необходимая для этого скачка, переходит в материальную форму.

Появляется также возможность поляризации вакуума. Вакуумное распределение электронов с отрицательными энергиями может быть нарушено под действием электрического или магнитного поля, при этом происходит своеобразная поляризация пространства. И все эти новые идеи возникли из релятивистского волнового уравнения для электрона.

Соединение теории относительности с квантовой механикой дало значение спина, равное половине кванта действия. В настоящее время известно много частиц, спины которых имеют другие значения. Особый интерес, конечно, представляет фотон, спин которого равен единице. Что нам делать с этими частицами? Это серьезная проблема.

Квантовую теорию для таких частиц можно построить, рассматривая состояния с какой-либо выделенной осью времени, и выяснить закон изменения этих состояний при повороте этой оси. Здесь, однако, мы встречаемся с той трудностью, что такие изменения нелокальны. Для ансамбля частиц можно построить полевые величины, изменяющиеся локальным образом, но при переходе к вероятностям для отдельных частиц мы вновь сталкиваемся с нелокальностью.

По-моему, с духом теории относительности не согласуется теория, использующая величины с нелокальным законом преобразования. Это значит, что мы берем некоторую величину в пространстве-времени с каким-то направлением временной оси, а при повороте этой оси получаем новую величину, относящуюся не только к непосредственной окрестности той точки, где была задана исходная величина, но и к областям пространства, отдаленным от нее в той или иной степени. Ситуация отчасти напоминает теорию дальнего действия. Это не очень хорошо с точки зрения теории относительности, но ничего лучшего у нас в настоящее время нет.

Трудность возникает также в том случае, когда у нас есть несколько частиц, взаимодействующих друг с другом. Единственная теория, которую мы можем сформулировать в настоящее время, является нелокальной, и ее, конечно, нельзя считать удовлетворительной. Я думаю, что задачу объединения квантовой теории с теорией относительности еще нельзя считать решенной. Понятия, используемые физиками в настоящее время, не совсем адекватны. Они кажутся очень искусственными, если их применять формально.

Трудность становится совершенно очевидной, если учесть, например, взаимодействие между электронами и электромагнитным полем. Если предположить, что это взаимодействие отвечает точечной модели электрона, то уравнения приводят к бесконечностям. Конечно, с бесконечностями нельзя мириться. Их надо как-то удалить, и наиболее естественный путь состоит в том, чтобы считать электрон не точечной частицей, а положить, что его заряд распределен в некоторой области пространства.

Многие придерживаются концепции точечного заряда, а бесконечности удаляют просто с помощью набора некоторых правил. Эти физики говорят, что надо отойти от обычной математики. Давайте, мол, не будем обращать внимания на бесконечности в наших уравнениях, если они нам нежелательны. Иногда этот формализм приводит к результатам, хорошо согласующимся с данными опыта, и такое положение вполне устраивает многих. Но мне это совсем не нравится. Мне кажется, что мы вовсе не обладаем строго определенными физическими понятиями, если нам приходится применять рабочие математические правила. Такое положение не может удовлетворить физиков.

Я мог бы упомянуть об одной идее, о которой много говорилось в эти дни: я имею в виду понятие о перенормировке. Это понятие появилось уже в классической теории, в модели электрона Лоренца. Согласно Лоренцу, электрон создает вокруг себя некоторое поле; в сущности, это поле Кулона с поправками, обусловленными движением электрона. Поле электрона обладает инерцией, которую следует добавять к массе электрона, так что физическая масса электрона должна частично состоять из массы, связанной с массой кулоновского поля вокруг него. Возможно, что и вся масса электрона возникла таким образом. И в этом случае мы должны отойти от точечной модели электрона, потому что масса, связанная с кулоновским полем, в этой модели была бы бесконечно велика.

Итак, в рассмотренном случае первоначальная масса частицы меняется из-за наличия создаваемого ею поля. Этот эффект существует и в квантовой механике, он приводит к тому, что первоначальная масса электрона, которая входит в исходные уравнения, становится отличной от наблюдаемой массы. Наблюдаемая масса называется перенормированной. Неприятность состоит в том, что эффект перенормировки бесконечно велик, если электрон считается точечной частицей. Точно так же появляется и перенормировка заряда: исходный заряд производит поляризацию вакуума и тем самым отчасти нейтрализуется. Этот эффект тоже бесконечен для точечного электрона.

Таким было развитие квантовой теории до настоящего времени. Очевидно, что современная ситуация далеко не удовлетворительна, так как совместить квантовую теорию с теорией относительности не удалось.

Развитие физики в последнее время было в значительной степени связано с введением новых частиц. Здесь также приходилось преодолевать некоторые предрассудки. Примерно до 1930 года считалось, что существуют лишь две фундаментальные частицы — электрон и протон. Причина такого представления состояла в том, что есть два типа электричества, положительное и отрицательное, для каждого из них нужно по частице, и больше ничего. До того времени существовало сильное предубеждение против введения новых частиц.

Это сбивало меня с толку, когда я впервые разрабатывал идеи относительно дырок в вакуумном распределении электронов. Мне

казалось, что поскольку дырки имеют положительный заряд, они должны представлять собой протоны. Вначале я справедливо считал, что дырки должны быть симметричны электронам и обладать такой же массой. Но мне трудно было представить себе, что может существовать другая частица с положительным зарядом и массой электрона. Я рассуждал так: если бы такие частицы существовали, то экспериментаторы их наверняка бы увидели.

Почему же экспериментаторы их не видели? Просто потому, что существовало предубеждение. Экспериментаторы проводили множество опытов, в которых частицы двигались по искривленным траекториям в магнитном поле. Если знак заряда известен, то кривизна указывает, в каком направлении двигалась частица по треку. Экспериментаторы регулярно наблюдали электроны, выпускаемые из источника и двигавшиеся по трекам с ожидаемой кривизмой. Иногда видели и противоположную кривизну, но интерпретировали такие треки как треки электронов, летевших в источник, а не треки положительно заряженных частиц, выпускаемых из источника. Таковы были общепринятые представления. Существовало настолько сильное предубеждение против новых частиц, что никто не сделал статистического подсчета частиц, попадавших в источник, и не установил поэтому, что число их слишком велико.

Приблизительно после 1930 года отношение физиков к новым частицам коренным образом изменилось. Было открыто много новых частиц; и экспериментаторы, и теоретики готовы были вводить новые частицы по малейшему поводу.

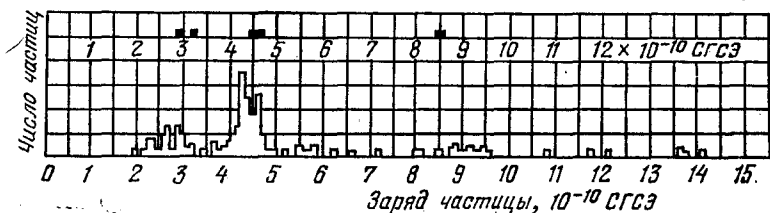
Существовало также предубеждение против дробного электрического заряда. Со времен Милликена, который провел очень точные измерения заряда электрона, физики предполагали, что все заряды, встречающиеся в Природе, кратны заряду электрона. Лишь в теориях, выдвинутых в последнее время, появились новые частицы, называемые кварками, с зарядами, составляющими некоторую долю заряда электрона. Заряд кварка обычного типа должен составлять $2/3$ заряда электрона.

Я вспоминаю о встречах с Эренгафтом, который проводил большую работу по измерению зарядов малых частиц. Он настаивал на том, что ему удалось открыть нечто, названное им субэлектроном, — объект, заряд которого меньше заряда электрона. Все считали Эренгафта чудачком, но принимали его всерьез, и он на это очень жаловался. А недавно мне пришло в голову, что теперь отношение к дробному заряду очень изменилось, и стоит взглянуть на результаты Эренгафта еще раз. Ранняя работа Эренгафта была очень неаккуратна, он приводил для заряда самые разные значения, но позднее его утверждения стали несколько более определенными. И все же его работа была чрезвычайно неточной и неаккуратной по сравнению с работами Милликена.

Я просмотрел его последнюю статью по измерению заряда электрона, опубликованную в 1941 году *). Там приведена диаграмма,

*) *Ehrenhaft F.* // *Philosophy of Science.* — 1941. — V. 8. — P. 403.

представляющая результаты многих опытов (см. рисунок). По горизонтали отложен измеряемый заряд, а по вертикали — число соответствующих частиц. Эренгафт проводил опыты, схожие с опытами Милликена, но использовал не капельки масла, а твердые шарики. Все опыты, данные о которых здесь приведены, сделаны с маленькими шариками из красного селена. На гистограмме определенно видны два пика. Основной пик — чуть ниже правильного значения, $4,7 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ, а второй, тоже вполне определенный, — примерно при значении заряда $2/3$ первого. Результат показался мне



довольно интересным, но значит ли это, что Эренгафт действительно наблюдал кварки? Смущает то, что этих субэлектронов было так много. Это кажется мне очень сомнительным, к тому же Эренгафт не был хорошим экспериментатором. По ширине пиков видно, что точность его результатов была низкой.

В верхней части рисунка видны несколько черных квадратиков. Они представляют результаты, для которых даны как заряды, так и размеры шариков. Здесь наблюдается вполне определенная корреляция между зарядом и размером: чем меньше частица, тем меньше ее заряд. Я думаю, что эти данные говорят против Эренгафта. Вероятно, у него была какая-то систематическая погрешность, которая привела к тому, что у более мелких частиц наблюдались меньшие заряды. Боюсь, однако, что мы никогда не узнаем причины появления этих двух пиков, потому что все экспериментальные данные погибли, когда гитлеровская армия вступила в Вену.

На летней школе в Варенне, посвященной истории физики, присутствовал доктор Холтон, который говорил о прежних измерениях заряда электрона. Он рассказывал о точных работах Милликена, а также о работе Эренгафта, довольно неточной и сильно дискредитированной в свое время. Холтон сказал мне о замечании, содержащемся в одной из статей Милликена, которое показалось мне очень интересным, и мне хочется привести его здесь. Иногда историки науки выкапывают что-нибудь весьма любопытное, похороненное в старой литературе. Это замечание Милликена приведено в его статье, опубликованной в 1910 году, в которой описаны опыты, послужившие основой для точного определения заряда электрона. Цитирую Милликена: «Я отбросил одно неопределенное и неподтвержденное наблюдение, указывавшее на единственную заряженную каплю с зарядом примерно на 30% ниже, чем правильное значение е».

Из этого замечания можно сделать два вывода. Во-первых, о научной честности Милликена. Многие экспериментаторы, получив результат, противоречащий тому, что они пытаются установить, и основной массе других наблюдений, сказали бы просто: «В тот день мой прибор был не в порядке. Не знаю, что там случилось, но я не могу воспроизвести этот результат, так что не стоит больше думать об этом и незачем об этом упоминать, когда я буду публиковать работу». Но Милликен был не таким. Он был скрупулезно честен и не скрывал результатов, которые не согласовывались с тем, что он хотел доказать. Второй вывод состоит в том, что у Милликена была всего одна капля, давшая отличавшийся результат. Это наводит на мысль, не сидел ли на той капле кварк. Вопрос этот мне придется оставить без ответа *).

В заключение мне хотелось бы сказать несколько слов о будущем. Разумеется, развитие физических представлений о Природе не остановилось и в настоящее время. Было бы ошибкой придавать нашим современным представлениям слишком большое значение. Мы находимся всего лишь на промежуточном этапе, и следует ожидать дальнейшего развития, которое будет иметь фундаментальное значение. Я думаю, что дальнейшее развитие будет столь же фундаментальным, как переход от боровских орбит к квантовой механике Гейзенберга. Не знаю, как долго нам придется ждать этого нового прогресса. Но он определенно произойдет, и, как я уже отмечал ранее, в конце концов прояснится проблема выбора между детерминизмом и индетерминизмом.

Люди часто пытаются предугадать способы получения новых идей. Некоторые работают над аксиоматической формулировкой современной квантовой механики. Не думаю, что это поможет. Представьте себе, что кто-то работает над аксиоматическим обоснованием теории боровских орбит; они никогда бы не пришли к квантовой механике Гейзенберга. Им никогда не пришло бы в голову, что надо усомниться в аксиоме коммутативности умножения. Точно так же и будущее развитие должно затронуть что-то такое, в чем никто до сих пор никогда не сомневался и что не вскроется при аксиоматической формулировке.

Часто спрашивают, не следует ли изменить представление о пространстве и времени. Может быть, надо считать их дискретными? Однако до сих пор обычному пространству-времени, используемому в физике, нет подходящей математической замены. Мне кажется, что едва ли стоит заниматься дальнейшими спекуляциями по этому поводу, и потому я хочу закончить.

*) Результаты, о которых говорил Дирак, не получили опытного подтверждения. — *Примеч. пер.*