

Нобелевская лекция
РАЗРАБОТКА КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ
В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМ АСПЕКТЕ

The Development of the Space-Time View of Quantum Electrodynamics.

В статьях, публикуемых в научных журналах, мы привыкли представлять свою работу в возможно более законченном и приглаженном виде, маскируя все следы своих усилий, забывая о подстерегавших тебя тупиках и не вспоминая о том, как сначала ты шел неверным путем, и т. п. Поэтому нам негде, не уронив своего достоинства, рассказать на страницах печати, как на самом деле удалось получить тот или иной результат, хотя в наши дни уже обнаруживается интерес к вещам подобного рода. Поскольку же получение премии — это событие личной жизни, я подумал, что при таких исключительных обстоятельствах мне было бы извинительно рассказать о своем отношении к квантовой электродинамике в личном плане, вместо того чтобы в тщательно отточенной и завершенной форме излагать сам этот предмет. Кроме того, поскольку в нынешнем году премия по физике присуждена сразу троим, вам может наскучить, если каждый из нас станет говорить о квантовой электродинамике. В связи с этим мне хотелось бы рассказать вам сегодня о последовательности событий, а вернее о цепочке идей, которая привела меня к возможности отыскать другой конец одной до сих пор не распутанной проблемы, за что я, собственно, и получил премию.

Я понимаю, конечно, что настоящий научный доклад представлял бы большую научную ценность, но такой доклад я всегда смогу опубликовать в научном журнале. Поэтому я воспользуюсь своей Нобелевской лекцией для того, чтобы сделать нечто менее ценное, но зато такое, чего нигде больше сделать нельзя. Я буду просить вашего снисхождения еще и по другому поводу. В своем выступлении я расскажу вам о некоторых эпизодах моей научной жизни, не имеющих никакой ценности ни с научной точки зрения, ни с точки зрения выяснения хода мысли. Я включил их сюда лишь для того, чтобы сделать лекцию более занимательной.

Над своей задачей я работал около восьми лет, опубликовав результаты работы в 1947 г. Все началось еще в Массачусетском технологическом институте, когда я был студентом последнего курса, изучал уже известные законы физики и медленно узнавал обо всем том, что волновало в то время ученых. В конце концов я понял, в чем заключалась основная проблема дня — в том, что квантовая теория электричества и магнетизма была не совсем удовлетворительной. Об этом я узнал из книг Гайтлера и Дирака. Некоторые замечания из этих книг вдохновляли меня. Это были совсем не те параграфы, где все доказано, тщательно обосновано и рассчитано, так как в этом мне было еще трудно по-настоящему разобраться. Я был тогда молод, и мне понятнее были замечания о том, что все это противоречит здравому смыслу, а последнюю фразу из книги Дирака я помню еще и сегодня: «По-видимому, здесь нужны принципиально новые физические идеи». В таких словах я видел вызов, они воодушевляли меня. Кроме того, мне казалось, что, поскольку никто не знает удовлетворительного решения задачи, которой я хотел бы заниматься, мне не обязательно утруждать себя изучением того, что уже известно.

Но из книг я понял, что все затруднения теорий квантовой электродинамики проистекали из двух обстоятельств. Во-первых, из бесконечной энергии взаимодействия электрона с самим собой. Этот источник трудностей существовал даже в классической электродинамике. Во-вторых, из бесконечностей, обусловленных бесконечным числом степеней свободы поля. В то время мне казалось (насколько я помню) так: последняя трудность состояла просто-напросто в том, что если кван-

товать гармонические осцилляторы поля (заполняющие, например, потенциальный ящик), то минимальная энергия каждого осциллятора оказывается равной $\hbar\omega/2$, а поскольку для ящика возможно бесконечное число видов колебаний, соответствующих различным значениям частоты ω , энергия, заключенная в ящике, оказывается бесконечной. Теперь я понимаю, что такая формулировка основной проблемы не была абсолютно правильной, в противном случае трудности можно было бы устранить, просто изменив нулевой уровень, от которого отсчитывается энергия. Так или иначе, я считал, что все трудности каким-то образом связаны одновременно и с действием электрона на самого себя, и с бесконечным числом степеней свободы поля.

Мне казалось совершенно очевидным, что представление об электроне, взаимодействующем с самим собой, о том, что электрические силы действуют на ту же самую частицу, которая их вызывает, излишне, что оно даже просто глупое. Поэтому для себя я решил, что электрон не может взаимодействовать с самим собой, а может взаимодействовать только с другими электронами. Но это значит, что никакого поля вообще нет. В самом деле, если все заряды создают одно общее поле, а поле действует на все заряды, то каждый заряд не может не действовать на самого себя. Ну, так вот здесь-то и кроется ошибка: никакого поля на самом деле нет. Верно то, что если вы качнете один заряд, другой качнется лишь через некоторое время. Заряды непосредственно взаимодействуют друг с другом, хотя и с некоторым запаздыванием. Закон силы, связывающий движение одного заряда с движением другого, должен предусматривать запаздывание. Качните этот заряд — другой качнется позже. Стоит начать колебаться атомам Солнца, как через восемь минут в результате прямого взаимодействия начнут колебаться и электроны атомов моих глаз.

Привлекательным в этом было то, что единым махом устранялись обе трудности. Во-первых, я мог сразу сказать: «Пусть электрон не может действовать на самого себя, он может действовать только на другой электрон. Тогда нет никакой собственной энергии!» А во-вторых, нет и бесконечного числа степеней свободы поля. Ведь поля нет совсем или, если вы непременно хотите пользоваться понятием поля, оно теперь всегда полностью определяется взаимодействием частиц, его создающих. Вы качнули эту частицу, а она в свою очередь качнула ту; но раз уж вы хотите говорить о каком-то поле, то это поле, если оно вообще существует, должно полностью определяться теми материальными частицами, которые его порождают, а поэтому у него нет никаких *независимых* степеней свободы. А тогда исчезают и бесконечности, связанные со степенями свободы. В самом деле, ведь каждый раз, когда мы смотрим и видим свет, мы всегда можем «увидеть» какой-то материальный объект, который служит источником света. Мы не видим света самого по себе (правда, недавно мы обнаружили радиоволны, материальный источник которых неизвестен).

Как видите, мой общий план состоял в том, чтобы сначала решить классическую задачу, освободиться от бесконечной собственной энергии в классической электродинамике, а затем, после того как я на этой основе построю квантовую теорию, все должно было устроиться самым чудесным образом.

Вот так все это и началось. Моя идея казалась мне настолько логичной и настолько изящной, что я влюбился в нее без памяти. А ведь влюбиться без памяти в женщину можно только тогда, когда ты ее еще мало знаешь, а потому не видишь всех ее недостатков. Недостатки ты увидишь позже, но любовь уже достаточно сильна, чтобы удерживать тебя. Так и я, благодаря своему юношескому энтузиазму, невзирая ни на какие трудности, оставался верен моей теории.

Позже я поступил в аспирантуру и там постепенно выяснил, чем плоха моя идея о том, что электрон не взаимодействует с самим собой. Когда электрон ускоряется, он начинает излучать энергию, и для того, чтобы покрыть этот дополнительный расход энергии, необходимо совершить дополнительную работу. Добавочную силу, против которой совершается эта работа, называют силой реакции излучения. И в то время считали, следуя Лоренцу, что это сила взаимодействия электрона с самим собой. Первый член в формуле для силы такого самодействия электрона описывает инерцию определенного рода (не совсем удовлетворительно с релятивистской точки зрения). Но этот «инерционный» член обращается в бесконечность в случае точечного заряда. В то же время следующий член, учитывающий скорость уменьшения энергии, в предположении о точечности заряда электрона полностью совпадает со скоростью наблюдаемого излучения энергии. Значит, сказав, что заряд не может взаимодействовать с самим собой, я потерял бы силу реакции излучения, совершенно необходимую для того, чтобы не нарушался закон сохранения энергии.

Вот так, уже аспирантом, я по ходу дела узнал о кричащем и очевидном упущении своей теории. Но я все еще был влюблен в нее и все еще верил, что она приведет нас к разрешению всех трудностей квантовой электродинамики. Поэтому я все время пытался спасти ее — то так, то этак. Мне нужно было, чтобы, когда я ускорял электрон, на него оказывалось какое-то воздействие, объясняющее возникновение реакции излучения. Но если я признаю лишь взаимодействие между различными электронами, то единственным мыслимым источником такого воздействия может быть какой-то другой электрон. И вот, в один прекрасный день, когда я работал у проф. Уилера и никак не мог решить задачу, которую он мне задал, я стал думать об этом снова и начал решать следующую задачу. Предположим, имеется два заряда. Качнем один из них, тот, который мы считаем источником. Это вызовет смещение второго. Но движение второго электрона будет влиять на источник. Расчет влияния на источник я и занялся, надеясь, что оно позволит объяснить появление сил реакции излучения. Конечно, у меня ничего не получилось, и я пошел к проф. Уилеру и рассказал ему о своих мыслях. Он сказал мне: «Да, но ответ для вашей задачи с двумя зарядами, о которой вы только что мне рассказали, к сожалению, должен зависеть от величины и массы второго заряда и будет обратно пропорционален квадрату расстояния R между зарядами. А ведь сила реакции излучения ни от чего этого не зависит». Наверняка он сам занимался такими расчетами, подумал я тогда. Теперь же, когда я сам стал профессором, я знаю, что человек, умудренный опытом, может сразу увидеть то, на выяснение чего у аспиранта уходит несколько недель. Уилер указал мне и еще одно обстоятельство, которое тоже озадачило меня, а именно: если наш электрон со всех сторон окружен другими зарядами, распределенными приблизительно с постоянной плотностью, то при суммировании действия всех зарядов величина R^2 в знаменателе сократится с множителем R^2 в выражении для элементарного объема и сумма окажется пропорциональной толщине экрана из окружающих источник зарядов, которая стремится к бесконечности. А это значит, что у нас получится бесконечно большое обратное действие на источник. Наконец, он сказал мне еще: «И вы забыли еще кое-что. Когда вы ускорите первый заряд, второй начнет ускоряться с запаздыванием, так что обратная реакция источника возникнет еще позже». Другим словами, взаимодействие происходит не тогда, когда нужно. И вдруг я понял, до чего же я глуп. Ведь то, о чем я говорил и что я вычислял, было просто отраженным светом, а не силой радиационного торможения.

Но насколько я был глуп, настолько умен был проф. Уилер. Он продолжал читать мне лекцию, как будто продумал все уже раньше и был полностью подготовлен к нашему разговору. На самом деле это было не так, он сам разбирался во

всем лишь в ходе нашего разговора. «Во-первых, — говорил он, — предположим, что обратное действие зарядов из поглощающего экрана приходит не только в виде обычных запаздывающих волн отраженного света, но и в виде опережающих волн, что законы взаимодействия распространяются не только на будущее, но и на прошлое». К этому времени я был уже в достаточной мере физиком, чтобы не сказать: «Ну нет, этого не может быть». Ведь сегодня после Эйнштейна и Бора все физики знают, что иногда идея, кажущаяся с первого взгляда совершенно парадоксальной, может оказаться правильной после того, как мы разберемся в ней до мельчайших подробностей и до самого конца и найдем ее связь с экспериментом. Поэтому перспектива использования опережающих волн для обратного действия, т. е. решения уравнений Максвелла, которым не пользовались в физике до этого, беспокоила меня не больше, чем проф. Уилера.

Проф. Уилер использовал опережающие волны для того, чтобы обратное действие возникало в нужное время, а затем предложил вот что. Если бы в поглощающем экране было много электронов, у него был бы определенный коэффициент преломления n , в результате чего у запаздывающих волн, генерируемых источником, при прохождении через экран несколько изменялась бы длина волны. Теперь, если предположить, что опережающие волны отражаются от поглощающего слоя без преломления (почему? — не знаю, просто предположим, что они не преломляются, и все тут), то разность фаз между отраженной и исходной волнами будет постоянно расти, так что результирующее обратное действие будет выглядеть, как будто оно определяется лишь слоем конечной толщины, его первой волновой зоной. [Точнее говоря, слоем такой толщины, на которой сдвиг фаз в веществе значительно отличается от того, что было бы в вакууме. Это толщина порядка $\lambda/(n - 1)$.] Чем меньше электронов в этом слое, тем меньше будет вклад в обратное действие каждого электрона, но в то же время тем толще будет слой, заметно влияющий на источник, так как чем меньше в нем электронов, тем меньше отличается от единицы его коэффициент преломления. Чем больше заряд каждого из этих электронов, тем больше обратное действие каждого из них, но в то же время тем тоньше эффективный слой отражения, так как это приведет к росту коэффициента преломления. И когда мы оценили это обратное действие на источник (вычислили его, не обращая внимания на точные значения числовых коэффициентов), оказалось, что оно совершенно не зависит от свойств зарядов, образующих окружающий поглощающий экран. Более того, оказалось, что по своему виду это действие вполне может представлять собой силу реакции излучения, но нам не удалось установить, правильно ли оно по порядку величины. Проф. Уилер отослал меня домой, поручив в точности выяснить, в каких отношениях нужно смешивать опережающие и запаздывающие волны, для того чтобы добиться численного совпадения, а после этого посмотреть, как обстоит дело с эффектами опережения, которые должны наблюдаться, когда пробный заряд находится очень близко к источнику. Ведь если все заряды генерируют не только запаздывающие, но и опережающие воздействия, то почему бы этому пробному заряду не реагировать на опережающие волны от источника?

Мне удалось выяснить, что правильный результат получается в том случае, когда опережающее и запаздывающее поля, генерируемые каждым источником, берутся в равных пропорциях (т. е. когда мы пользуемся тем решением уравнений Максвелла, которое симметрично во времени), и что причина, по которой мы не наблюдаем никаких опережающих эффектов в точке, близкой к источнику, несмотря на то, что источник генерирует опережающее поле, заключается в следующем. Представьте себе, что источник окружен сферическим поглощающим экраном, рас-

положенным в десяти световых секундах от него, и что пробный заряд находится на расстоянии в одну световую секунду справа от источника. Тогда этот пробный заряд находится на расстоянии одиннадцати секунд от одних участков экрана и только в девяти секундах от других его участков. Действие источника в момент $t = 0$ вызывает реакцию зарядов экрана в момент $t = +10$. Но опережающее влияние этой реакции может действовать на пробный заряд на целых одиннадцать секунд раньше, т. е. начиная с $t = -1$. А ведь именно в этот момент в место расположения пробного заряда приходит прямая опережающая волна от источника. Так вот, оказывается, что влияния этих воздействий одинаковы по величине и противоположны по знаку, так что они взаимно уничтожаются! В более поздний момент времени $t = +1$ воздействия непосредственно от источника, с одной стороны, и от экрана — с другой, снова равны по величине, но на этот раз их знаки совпадают, в результате чего они складываются и превращают половинную запаздывающую волну от источника в волну, совпадающую с полной запаздывающей волной прежней теории.

Таким образом, стало ясно: если предположить, что все воздействия описываются половиной опережающего и половиной запаздывающего решения уравнений Максвелла и что всякий источник окружен каким-то материалом, поглощающим весь испускаемый свет, то тогда появление реакции излучения можно объяснить прямым действием зарядов поглощающего экрана, оказывающих обратное действие на источник посредством опережающих волн.

На то, чтобы проверить все это, ушли многие месяцы. Мне нужно было показать, что результат не зависит от формы экрана и других подобных факторов, что соотношения оказываются совершенно правильными и что эффект опережающих воздействий действительно исчезает во всех случаях. Мы искали все более убедительные доказательства и старались как можно лучше уяснить себе, на чем держится наша теория. Но не стану утомлять вас подробностями. Из-за того, что мы пользовались опережающими волнами, мы сталкивались, естественно, с многими кажущимися парадоксами, которые нам удалось разрешить один за другим, пока мы окончательно не убедились, что в нашей теории действительно не было никаких логических погрешностей. Она была вполне удовлетворительной.

Кроме того, мы выяснили, что все это можно сформулировать еще и по-другому — с использованием принципа наименьшего действия. Поскольку мой первоначальный план состоял в том, чтобы описывать все непосредственно с точки зрения движения частиц, мне хотелось представить эту новую теорию даже не упоминая о полях. Так вот, нам удалось найти такое выражение для действия, учитывающего только движение зарядов, что его вариация давала уравнения движения этих зарядов. Это выражение для действия A имеет вид

$$A = \sum_i m_i \int (\dot{X}_\mu^i \dot{X}_\mu^i)^{1/2} + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} e_i e_j \iint \delta(I_{ij}^2) \dot{X}_\mu^i(\alpha_i) \dot{X}_\mu^j(\alpha_j) d\alpha_i d\alpha_j, \quad (1)$$

где

$$I_{ij}^2 = [X_\mu^i(\alpha_i) - X_\mu^j(\alpha_j)][X_\mu^i(\alpha_i) - X_\mu^j(\alpha_j)],$$

$X_\mu^i(\alpha_i)$ — четырехмерный радиус-вектор i -й частицы как функция некоторого параметра α_i , а $\dot{X}_\mu^i(\alpha_i) = dX_\mu^i(\alpha_i)/d\alpha_i$. Первый член этого выражения — это просто интеграл от собственного времени, обычное действие релятивистской механики свободных частиц с массой m_i (как обычно, здесь производится суммирование по

повторяющимся индексам μ). Второй же член описывает электрическое взаимодействие зарядов. Суммирование производится по всевозможным парам зарядов (множитель $1/2$ введен для того, чтобы каждую пару учитывать только один раз, а член с $i = j$ отброшен для того, чтобы исключить действие зарядов на самих себя). Взаимодействие представлено в виде двойного интеграла от дельта-функции от квадрата пространственно-временного интервала I^2 между двумя точками, лежащими на пути интегрирования. Таким образом, о взаимодействии можно говорить только в том случае, когда этот интервал обращается в нуль, т. е. когда один из зарядов лежит на световом конусе другого.

Благодаря тому что взаимодействие было принято точно наполовину опережающим и наполовину запаздывающим, оказалось возможным сформулировать такой принцип наименьшего действия, который не удастся получить, если считать взаимодействие лишь запаздывающим.

Итак, в столь простом выражении содержалась вся классическая электродинамика. Оно выглядело очень хорошо, и потому, безусловно, было верным, по крайней мере для начинающего. Оно автоматически давало наполовину опережающие и наполовину запаздывающие воздействия, и притом без всяких полей. Отбросив же члены с $i = j$, я тем самым исключил самодействие, и теперь уже не было бесконечной собственной энергии. А значит, это и было желанным решением проблемы, освобождающим классическую электродинамику от ее бесконечностей.

Конечно, если вам очень хочется, вы можете восстановить поля в их правах, но тогда нужно следить за всеми полями, генерируемыми всеми частицами по отдельности. Дело в том, что при определении поля, действующего на данную частицу, нужно исключить поле, создаваемое ею самой. Единое общее поле, сумма всех индивидуальных, уже не годилось. Такая же идея была высказана ранее Френкелем, и поэтому мы называли эти поля — полями Френкеля. Наша теория, учитывавшая лишь взаимодействие между разными частицами, была эквивалентной теории полей Френкеля, использующей наполовину опережающие и наполовину запаздывающие решения.

Сами собой напрашивались разные интересные видоизменения электродинамики. Мы разобрали массу таких видоизменений, но я расскажу вам только об одном. Идея была в том, чтобы дельта-функцию в выражении для взаимодействия заменить какой-то другой функцией, скажем $f(I_{ij}^2)$, которая возрастала бы в нуле не бесконечно быстро. Вместо того чтобы получить взаимодействие только тогда, когда интервал между двумя зарядами точно равен нулю, мы могли бы заменить бесконечно острую дельта-функцию от I^2 узким, но конечным пиком. Предположим, например, что $f(Z)$ велика только в некоторой малой окрестности нуля шириной порядка a^2 . Тогда взаимодействие между зарядами наступит уже при $T^2 - R^2$, грубо говоря, порядка a^2 , где T — разница во времени, а R — расстояние между зарядами в пространстве. Может показаться, что это противоречит опыту, но если расстояние a достаточно мало, скажем порядка 10^{-13} см, то оказывается, что запаздывание действия T , грубо говоря, равно $(R^2 \pm a^2)^{1/2}$ или, если R намного больше a , приближенно равно $R \pm a^2/2R$. А это значит, что отклонение времени T от идеального с точки зрения максвелловской теории значения R тем меньше, чем дальше разнесены электроны. Поэтому во всех теориях, используемых для расчета генераторов, двигателей и тому подобного, и даже для анализа любого эксперимента по электродинамике, возможного во времена Максвелла, не будет никаких погрешностей, если a выбрать порядка 10^{-13} см. Ведь даже если R порядка 1 см, ошибка в величине T не превышает 10^{-26} . Таким образом, оказалось также возможным внести в теорию несложные изменения, не нарушив при этом ее согласия

со всеми наблюдениями классической электродинамики. У нас не было каких-либо конкретных соображений о том, какую же именно функцию нужно выбрать в качестве f , но это была интересная возможность, которую не следовало выпускать из виду, разрабатывая квантовую электродинамику.

Кроме того, нам пришло в голову, что если бы мы так и поступили (т. е. заменили δ на f), то уже не смогли бы восстановить в сумме члены с $i = j$, так как теперь они описывали бы инвариантным с релятивистской точки зрения образом конечное действие заряда на самого себя. Можно было даже доказать, что если бы мы так сделали, основным эффектом такого самодействия (при не слишком больших ускорениях) было бы изменение массы частицы. Тогда даже не нужно было бы вводить специально член, содержащий массу m_i . Всю механическую массу можно было бы рассматривать как результат электромагнитного взаимодействия заряда с самим собой. Таким образом, при желании мы могли бы построить другую теорию с еще более простым выражением для действия A . В выражении (1) сохранился бы лишь второй член, суммирование проводилось бы по всем i и j , а δ -функцию нужно было бы заменить на f . В такой простой форме можно было бы представить всю классическую электродинамику, которая, если оставить в стороне теорию тяготения, составляет практически все содержание классической физики.

Хотя это и может походить на путаницу, я одновременно излагаю несколько различных возможных теорий. Дело в том, что тогда все эти теории представлялись нам одинаково ценными. У нас было несколько возможных способов устранения трудностей классической электродинамики, и любой из них мог оказаться хорошим отправным пунктом для преодоления затруднений квантовой электродинамики.

Мне хотелось бы подчеркнуть, что тогда я уже начал привыкать к физической точке зрения, отличной от общепринятой. Как правило, обычно подробно исследуют развитие процессов во времени. Например, зная состояние поля в настоящий момент, вы можете при помощи дифференциальных уравнений определить его состояние в следующий момент времени и так далее. Этот метод, метод динамических дифференциальных уравнений, в дальнейшем я буду называть методом Гамильтона. У нас же было нечто [например, в уравнении (1)], что характеризовало сразу весь путь в пространстве и во времени. Поведение природы мы определяли, указывая, что ее пространственно-временной путь в целом обладает такими-то и такими-то особенностями. В случае (1) уравнения, полученные в результате вычисления вариации относительно $X_{\mu}^i(\alpha_i)$, совсем не так-то просто привести обратно к виду, привычному для метода Гамильтона. Если вы хотите пользоваться в качестве переменных лишь координатами частиц, то вы можете говорить о характере траекторий. Но характер траектории одной частицы в данный момент времени зависит от характера траектории другой частицы в совершенно другой момент времени. Поэтому, если вы попытаетесь воспользоваться дифференциальным способом описания, указывая, каково состояние частиц в данный момент и как это состояние отразится на будущем, то окажется, что этого нельзя сделать, учитывая лишь состояния частиц, так как будущее будет зависеть от того, что было с частицами в прошлом.

В связи с этим вам понадобится множество «учетно-регистрационных» переменных, чтобы учесть, чем занимались ваши частицы в прошлом. Такие переменные называют полевыми. Для того чтобы вы могли установить, что будет происходить в дальнейшем, вам обязательно придется говорить не только о теперешнем состоянии частиц, но и о теперешнем состоянии поля. При единой же пространственно-временной формулировке принципа наименьшего действия поле исчезает, превращаясь всего лишь в совокупность «учетных» переменных, необходимых при методе Гамильтона.

Такой взгляд на вещи дал нам один побочный продукт. Однажды в аспирантуру в Принстоне мне позвонил проф. Уилер и сказал: «Фейнман! Я знаю, почему у всех электронов одинаковый заряд и одинаковая масса». — «Почему же?» — «Потому что все это один и тот же электрон». И затем он тут же по телефону объяснил: «Представьте себе, что все мировые линии, которые мы с вами обычно рассматривали раньше в четырехмерном (пространство-время) пространстве (вместо того чтобы следить лишь за развитием траекторий во времени), запутаны в невероятный узел. Разрежем этот узел плоскостью, соответствующей некоторому фиксированному моменту времени. Тогда мы увидим множество мировых линий, и они будут соответствовать множеству электронов, правда за одной оговоркой. Если один отрезок такой линии будет соответствовать обычному электрону, то на другом отрезке, по которому он пятится назад, по которому он возвращается из будущего, будет обратный знак собственного времени — собственной четырехмерной скорости, а это эквивалентно изменению знака заряда. Другими словами, эта часть траектории будет описывать поведение позитрона». — «Но, профессор, — говорю я, — позитронов ведь не столько, сколько электронов». — «Ну, может, они спрятаны в протонах или еще где-нибудь», — говорит он. Должен признаться, к его идее о том, что все электроны это на самом деле всего один электрон, я отнесся менее серьезно, нежели к его идее о том, что позитрон можно представить себе просто-напросто как электрон, возвращающийся из будущего в прошлое по обратным участкам мировых линий. Эту, вторую идею я просто украл!

В общем, когда я разобрался во всем этом, у меня, как у физика, оказалось два ценных приобретения. Во-первых, я узнал много различных способов записи законов классической электродинамики, совершенно разное их математическое выражение. Я научился описывать объект исследования всеми способами. Во-вторых, у меня выработалась своя точка зрения (единая пространственно-временная точка зрения) и пренебрежение к гамильтоновым методам описания физических явлений.

Здесь мне хотелось бы прервать свой рассказ и сделать одно замечание. То, что электродинамику можно построить столькими различными способами, — на основе дифференциальных уравнений Максвелла, на основе различных принципов наименьшего действия с полями, на основе различных принципов наименьшего действия без полей, всеми различными способами, — об этом я знал, но никогда не понимал этого до конца. Мне всегда казалось странным, что самые фундаментальные законы физики после того, как они уже открыты, все-таки допускают такое невероятное многообразие формулировок, по первому впечатлению неэквивалентных, и все же таких, что после определенных математических манипуляций между ними всегда удается найти взаимосвязь. Пример тому квантовая механика, в основу которой можно положить и уравнение Шредингера, и формализм Гейзенберга. Я не знал, чем это можно объяснить, это остается для меня загадкой, но я познал это на своем собственном опыте. Всегда можно сказать то же самое по-другому и так, что это будет совсем непохоже на то, как вы говорили об этом раньше. Я не знаю, в чем тому причина. Мне думается, что здесь каким-то образом отражается простота природы. Утверждение вроде формулировки закона обратных квадратов прекрасно может быть выражено через решение уравнения Пуассона, а это совершенно иной способ, ничем не напоминающий прежнего. Я не знаю, что должно означать это желание природы выбирать такие любопытные формы, но, может быть, в этом и состоит определение простоты. Может быть, вещь проста только тогда, когда ее можно исчерпывающим образом охарактеризовать несколькими различными способами, еще не зная, что на самом деле ты говоришь об одном и том же.

Теперь я был убежден, что раз уж мы разрешили проблему классической электродинамики,

тродинамики (и в полном соответствии с моей программой времен Массачусетского технологического института, т. е. ограничиваясь лишь прямым взаимодействием между частицами, так что понятие поля оказывается ненужным), то дальше наверняка все будет в полном порядке. Я был совершенно уверен в том, что мне осталось только построить квантовую теорию, аналогичную классической, — и тогда все трудности будут раз и навсегда разрешены.

Итак, дело стояло только за тем, чтобы построить квантовую теорию, классическим аналогом которой служило бы выражение (1). Но универсального способа преобразования классической механики в квантовую теорию не существует, хотя большинство учебников и пытается убедить вас в этом. В учебниках вам говорят, что нужно найти обобщенные переменные, импульсы, и заменить их оператором $(\hbar/i)(\partial/\partial x)$. Но мне-то негде было взять импульсов, их у меня просто не было.

В духе квантовой механики тех дней было записывать все при помощи знаменитого метода Гамильтона — в виде дифференциального уравнения, описывающего, как изменяется во времени волновая функция, и содержащего один оператор H . Когда классическую физику можно свести к форме Гамильтона, — все прекрасно. Но принцип наименьшего действия не допускает гамильтоновой формулировки, если действие зависит не только от координат и скоростей, измеренных в один и тот же момент времени, но и еще от чего-нибудь. Если действие имеет вид интеграла от некоторой функции (которую обычно называют лагранжианом) скоростей и координат, соответствующих одному и тому же моменту времени,

$$S = \int L(\dot{x}, x) dt, \quad (2)$$

то можно начать с этого лагранжиана, найти гамильтониан и затем построить квантовую механику более или менее однозначно. Но в нашем случае в формуле для действия (1) основные переменные, координаты, соответствуют двум разным моментам времени, а потому было не ясно, каким образом построить квантовомеханический аналог моей классической теории.

Но я все же искал решение и испробовал разные пути. Один из них был такой. Если бы у меня были гармонические осцилляторы, взаимодействующие между собой с запаздыванием, я мог бы определить их нормальные моды и предположить, что квантовая теория нормальных мод должна быть такой же, как и для обычного осциллятора, а потом каким-то образом вернуться назад к исходным переменным. Сделать это мне удалось, и я надеялся обобщить результат на системы, более сложные, нежели системы гармонических осцилляторов. Но тут, к сожалению, я столкнулся с тем, что было уже известно многим. Гармонический осциллятор слишком прост; очень часто вы можете выяснить, что с ним будет в квантовой теории, и не получить при этом никакого ключа к тому, как этот результат можно обобщить на другие системы.

Так что во всем этом было мало проку. Но однажды, когда я все еще мучился над этой задачей, я решил пойти на вечеринку, «на пиво», в таверну «Нассау» в Принстоне. Там же был и только что приехавший из Европы Герберт Йеле, который подсел ко мне за столик. По-видимому, европейцы гораздо серьезнее нас, американцев, потому что и вечеринка им кажется вполне подходящим местом для научных разговоров. Итак, Йеле уселся рядом со мной и спросил: «Чем вы сейчас занимаетесь?» или что-то в этом роде, на что я ответил: «Пью пиво». Но тут я сообразил, что ему хотелось узнать, над чем я работаю, и я рассказал ему о моих мытарствах со своей задачей. Потом я повернулся к нему и сказал: «Послушайте, а вы не знаете метода квантования, отправляющегося от действия — когда в квантовой механике используется интеграл действия?» — «Нет, — ответил он, — но

у Дирака есть статья, в которой он использует в квантовой механике по крайней мере лагранжиан. Я покажу вам ее завтра».

На следующий день мы отправились в Принстонскую библиотеку (там есть такие маленькие боковые комнаты, где можно беседовать), и он показал мне эту статью. В ней Дирак утверждал следующее. В квантовой механике имеется исключительно важная величина, осуществляющая преобразование волновой функции, определенной в один момент времени, в волновую функцию, определенную в другой момент времени, не при помощи дифференциального уравнения, а другим эквивалентным образом, что-то вроде интегрального ядра, которое мы можем обозначать через $K(x', x)$ и которое преобразует волновую функцию $\psi(x)$, известную в момент времени t , в волновую функцию $\psi(x')$, определенную в момент времени $t + \varepsilon$. Так вот, в своей статье Дирак указывал, что в классической механике этой функции K аналогична величина, которая равна экспоненте от лагранжиана $L(\dot{x}, x)$, умноженного на $i\varepsilon$ и вычисленного в предположении, что точки x и x' соответствуют времени t и $t + \varepsilon$. Другими словами, утверждалось, что $K(x', x)$ аналогично

$$\exp \left[i\varepsilon L \left(\frac{x' - x}{\varepsilon}, x \right) \right].$$

Вот это и показал мне проф. Йеле. Я прочел статью, он мне ее объяснил, и я спросил его: «А что он имеет в виду, когда говорит, что они аналогичны? Что значит *аналогично*? Как это можно использовать?» — «Вы, американцы, всегда так! — ответил профессор. — Всегда вы пытаетесь во всем найти какую-то пользу!» Я сказал ему, что Дирак, должно быть, хотел сказать, что они равны. «Нет, — объяснил он мне, — он не имел в виду, что они равны». — «Ладно, — сказал я, — давайте посмотрим, что выйдет, если мы их приравняем друг другу».

Итак, я просто приравнял эти два выражения, выбрав в качестве простейшего примера лагранжиан вида $M\dot{x}^2/2 - V(x)$, но вскоре понял, что в это равенство необходимо ввести специальным образом подобранный коэффициент пропорциональности A . И когда я подставил вместо K выражение $Ae^{i\varepsilon L}$, то в результате получил

$$\psi(x', t + \varepsilon) = \int A \exp \left[\frac{i\varepsilon}{\hbar} L \left(\frac{x' - x}{\varepsilon}, x \right) \right] \psi(x, t) dx, \quad (3)$$

а затем я взял интеграл, пользуясь разложением в ряд Тэйлора, и у меня получилось уравнение Шредингера. Я повернулся к проф. Йеле, еще не понимая по настоящему, что произошло, и сказал ему: «Вот видите, профессор, Дирак хотел сказать, что они пропорциональны». У проф. Йеле просто глаза полезли на лоб — он выхватил маленькую записную книжечку и начал быстро списывать с доски, говоря: «Нет, нет, это важное открытие. Вы, американцы, всегда стараетесь выяснить, как можно что-то использовать. Это отличный способ делать открытия!» Я думал, что пытаюсь выяснить смысл сказанного Дираком в его статье, а оказалось, что сделал открытие; то, что Дирак считал аналогичным, в действительности было равным. Теперь у меня появилась по крайней мере связь между лагранжианом и квантовой механикой, хотя и по-прежнему с волновыми функциями и бесконечно малыми приращениями времени.

Спустя день или около того, когда я лежал в постели и думал обо всем этом, я представил себе, что же произойдет, если я захочу вычислить значение волновой функции через конечный промежуток времени.

Я должен буду воспользоваться одним из этих множителей $e^{i\varepsilon L}$ под интегралом, и это даст мне волновую функцию для следующего момента времени $t + \varepsilon$. Затем я

могу подставить полученное снова в формулу (3), еще раз воспользоваться ядром $e^{i\epsilon L}$ и в результате получить значение волновой функции в следующий момент времени $t + 2\epsilon$ и так далее и тому подобное. Получалось большое число интегралов, которые нужно брать последовательно один за другим. Каждая подинтегральная функция представляла собой произведение экспонент, так что в результате получалась, естественно, экспонента, показателем которой была сумма членов вида ϵL . Но ведь L — это лагранжиан, а ϵ играет роль интервала времени dt , так что вычислять сумму такого рода слагаемых — это совершенно то же самое, что вычислять интеграл. Это ведь очень похоже на римановское определение интеграла $\int L dt$; вам просто нужно взять значения подинтегральной функции в каждой точке и сложить их. Конечно, для этого нам нужно перейти к пределу при $\epsilon \rightarrow 0$. Поэтому зависимость между волновой функцией в один момент времени и волновой функцией через конечный промежуток времени можно получить посредством бесконечного (из-за того, что $\epsilon \rightarrow 0$) числа интегралов от экспоненты $e^{iS/\hbar}$, где S — действие, соответствующее формуле (2). Наконец-то мне удалось найти основное выражение для квантовой механики, в которое входило непосредственно действие S .

Позднее это натолкнуло меня на мысль об амплитуде для траектории: для каждой возможной траектории, по которой частица может попасть из одной точки четырехмерного пространства в другую, существует своя амплитуда вероятности. Эта амплитуда равна $e^{iS/\hbar}$, где S — действие вдоль данной траектории. Для таких амплитуд выполняется принцип суперпозиции, так что амплитуда множества из нескольких траекторий определяется простым сложением амплитуд для каждой из входящих в это множество траекторий. Таким образом, появился новый, третий способ описания квантовой механики, который внешне ничем не напоминал формулировок Шредингера или Гейзенберга, но был им полностью эквивалентен.

Теперь, сразу после того, как я сделал несколько расчетов для проверки этого метода, мне прямо-таки не терпелось, конечно, подставить вместо действия (2) свое выражение (1). Первая трудность возникла уже из-за того, что у меня ничего не получилось в релятивистском случае, когда спин равен одной второй. Но, хотя я и не мог решать релятивистских задач, я очень хорошо справлялся со световым или фотонным взаимодействием, подставляя просто-напросто вместо действия ту часть выражения (1), которая описывает взаимодействие, и заменяя члены с массой нерелятивистским действием $(M\dot{x}^2/2)dt$. В том случае, когда у действия есть запаздывание, как это и было в моем случае, и когда в нем учитываются величины, относящиеся к разным моментам времени, мне приходилось жертвовать понятием волновой функции. Другими словами, я не мог уже ставить задачу так: в некоторый момент времени задана амплитуда для всех точек пространства; вычислить аналогичную амплитуду для некоторого другого момента времени. Но это не вызвало каких-либо серьезных затруднений. Просто это натолкнуло меня на новую мысль. Вместо того чтобы говорить о волновых функциях, мы могли теперь поступать следующим образом. Пусть у нас имеется некоторый источник, испускающий частицу, и детектор, который может ее обнаружить. Тогда мы можем определить амплитуду вероятности того, что источник испустит, а детектор уловит эту частицу. При этом нам не нужно будет уточнять, в какой именно момент времени частица была испущена источником или в какой именно момент она попала в детектор. Нам не требуется также фиксировать ни одно из промежуточных состояний частицы. Достаточно найти амплитуду вероятности всего эксперимента в целом. А затем мы могли бы, не пользуясь никакими волновыми функциями, рассматривать вопрос о том, как изменится эта амплитуда, если на пути от источника к детектору возможно рассеяние, если повернуть систему, изменить углы и т. д.

Кроме того, оказалось возможным выяснить, что означают при таком обобщен-

ном действии наши старые понятия энергии и количества движения. И я уверился в том, что я построил квантовую теорию классической электродинамики, или, вернее сказать, той новой классической электродинамики, которая основывается на действии (1). Я провел целый ряд проверок. Если я становился на точку зрения френкелевских полей, которая, как вы помните, ближе смыкалась с дифференциальной формулировкой, я мог непосредственно преобразовывать эту теорию в квантовую механику более привычным путем. Вопрос был лишь в том, как перевести на язык квантовой механики классические краевые условия, позволяющие использовать только наполовину опережающие и наполовину запаздывающие решения. Путем некоторых ухищрений я выяснил наконец, что это значит, и тут оказалось, что квантовая механика в сочетании с полями Френкеля и определенными краевыми условиями дает, на этот раз в качестве следствия, все то же действие (1) для нового вида квантовой механики с запаздыванием. Таким образом, самые различные расчеты указывали на то, что, вне всякого сомнения, мне удалось все выправить.

Теперь было нетрудно догадаться, как видоизменить такую электродинамику, если кому-нибудь это потребуется. Нужно только заменить дельта-функцию на f , точно так же, как я это сделал бы в классическом случае. Это совсем нетрудно, даже очень просто. Чтобы переписать старую теорию с запаздываниями, не упоминая явным образом о полях, мне нужно было бы записывать выражения для вероятностей, а не для амплитуд. А для этого мои амплитуды пришлось бы возводить в квадрат, что привело бы к двойным интегралам по путям с двумя S и т. п. И все же, когда я разделялся со всем этим и исследовал разные формы и различные краевые условия, у меня возникло какое-то странное чувство, что здесь не все благополучно. В чем именно было дело, я не знал, и в один из коротких периодов, когда мне казалось, что все улажено, я опубликовал диссертацию, защитил ее и получил степень доктора.

Во время войны мне было некогда работать над этими вещами, но по дороге в автобусе и т. д. я то и дело задумывался над этим, царапая формулы на клочках бумаги, и действительно обнаружил, что в моей теории не все благополучно, далеко не все благополучно. Оказалось, что при попытке обобщить теорию с «хороших» лагранжианов типа (2) на случай лагранжианов типа (1), величины, которые я определял как энергию, или другие величины такого же типа оказываются комплексными. Значения энергий стационарных состояний оказываются комплексными, а не действительными. Кроме того, вероятности событий в этом случае не составляют в сумме 100%. Иными словами, если определить вероятность того, что произойдет одно, затем вероятность того, что произойдет другое, и так для всех мыслимых вариантов, сумма всех вероятностей окажется меньше единицы.

Еще одна задача, с которой я очень долго возился, заключалась в том, чтобы при помощи новой квантовой механики описать релятивистский электрон. Мне хотелось сделать это единым и совершенно самостоятельным способом, а не просто переписывая операторы Дирака в виде какого-то выражения и пользуясь алгеброй Дирака вместо обычной алгебры комплексных чисел. И меня очень воодушевляло то, что для случая одномерного пространства мне действительно удалось найти способ приписать амплитуду каждой траектории, ограничиваясь рассмотрением только тех траекторий, которые ведут вперед или назад со скоростью света. Выражение для такой амплитуды было крайне простым, это было ε в степени, равной числу изменений знака скорости, причем я разбивал весь временной интервал на подинтервалы длины ε и допускал изменение скорости лишь в конечных точках таких подинтервалов. Таким способом я мог (устремляя ε к нулю) получить двумерное уравнение Дирака — одно измерение для времени, а другое — для пространства

($\hbar = M = c = 1$).

Обычная волновая функция Дирака содержит четыре составляющие для четырех измерений, но в данном случае у нее было лишь две составляющие, и необходимость двух составляющих автоматически следовала из самого правила вычисления амплитуды для траектории. Дело в том, что при такой формуле для вычисления амплитуды траектории, зная полное значение амплитуды для всех траекторий, сходящихся в заданной точке, вы еще не можете определить амплитуду вероятности достижения следующей точки. Ибо если из следующей точки путь выходит вправо, то новый множитель $i\varepsilon$ не появляется, когда путь и приходит в нее справа, но появляется, когда путь приходит слева. Поэтому, чтобы обеспечить всю нужную информацию и в следующий момент, недостаточно суммарной амплитуды прихода, а нужно еще знать по отдельности амплитуду прихода справа и прихода слева. Но если такая информация у вас имеется, то вы можете снова определить обе составляющие по отдельности для будущего момента времени, откуда следует, что для того, чтобы написать дифференциальное уравнение (первого порядка относительно времени), необходимо сохранить обе эти амплитуды.

Я мечтал о том, как, будь я поумнее, я нашел бы выражение для амплитуды траектории, которое было бы изящным и простым для всех трех измерений пространства и четвертого — времени, выражение, которое было бы эквивалентным уравнению Дирака и из которого естественным образом вытекали бы все эти четырехмерные волновые функции, матрицы и другие непонятные математические штуки, — но сделать это мне так и не удалось. Все же я хочу рассказать вам о некоторых из моих неудачных попыток, которые потребовали от меня почти столько же усилий, как и те, что оказались успешными.

В общем за несколько лет моих занятий квантовой электродинамикой у меня накопился, я бы сказал, значительный опыт. По крайней мере я знал много различных вариантов ее формулировки — с использованием интегралов по путям от действия и в других видах. Одним из важных побочных результатов такого экспериментирования с простыми формами оказалось, например, следующее. Мне было ясно, как объединить в одно целое то, что в то время называли продольными и поперечными полями, и вообще нетрудно было убедиться в релятивистской инвариантности такой теории. В обычной квантовой электродинамике из-за того, что там все должно быть в форме дифференциальных уравнений, поле расщепилось на две части: одну — которую называли продольной частью, и другую — представленную фотонами или поперечными волнами и называвшуюся поперечной. Продольная часть поля описывалась кулоновским потенциалом мгновенного действия, удовлетворяющим уравнению Шредингера, тогда как поперечная часть описывалась совершенно иначе — на основе квантования поперечных волн. Такое разделение поля на две части существенно зависело от наклона оси времени в релятивистском четырехмерном пространстве. Это означает, что, двигаясь с разными скоростями, вы по-разному разлагали бы одно и то же поле на его продольную и поперечную части. Более того, вся формулировка квантовой механики, упорно державшаяся за волновые функции, определенные для данного момента времени, не поддавалась релятивистскому анализу. Всякий, кто пользуется другой системой координат, вычислял бы последовательность событий при помощи волновых функций, определенных на иных сечениях четырехмерного пространства, иначе разделяя поле на поперечную и продольную составляющие. Гамильтонова формулировка казалась релятивистски неинвариантной, хотя на самом деле она, конечно, была инвариантной. Одно из основных преимуществ моей единой точки зрения как раз и заключалось в том, что она сразу же позволяла увидеть релятивистскую инвариантность теории, или, как сказал бы Швингер, ковариантность стала явной.

Таким образом, я обладал тем преимуществом, что у меня была явно ковариантная форма квантовой электродинамики, возможные пути ее модификации и т. п. Недостатком же моей теории было то, что если бы я принял ее слишком серьезно (вернее говоря, хоть сколько-нибудь серьезно отнесся к ней в тогдашнем ее виде), я сразу натолкнулся бы на неприятности, связанные с тем, что энергия в ней оказывается комплексной, полная вероятность меньше единицы и т. д. Разрешить же все эти проблемы мне никак не удавалось.

Но тут Лэмб поставил свой опыт, измерив разность частот уровней $2S_{1/2}$ и $2P_{1/2}$, которая оказалась равной приблизительно 1000 Мгц . Проф. Бете, с которым я тогда работал в Корнельском университете, это такой человек: если имеется какое-то хорошее экспериментальное число, он непременно должен получить его из теории. И он буквально выжал из квантовой электродинамики того времени результат, дававший ему нужное значение расстояния между этими двумя уровнями. При этом он указал на то, что, поскольку собственная энергия самого электрона бесконечна, бесконечной должна получаться и энергия связанного электрона. Но когда вы вычисляете расщепление двух энергетических уровней, пользуясь вместо обычного значения массы ее эмпирическим значением, теория должна, как полагал Бете, давать сходящийся конечный ответ. Пользуясь таким методом, он прикинул величину сдвига между этими уровнями и обнаружил, что она по-прежнему расходится. Он объяснил это тем, что пользовался нерелятивистской теорией. Предполагая, что с учетом релятивистских эффектов все будет сходиться, он произвел необходимые вычисления и получил для лэмбовского сдвига величину порядка тысячи мегагерц, совершив, таким образом, наиболее важное открытие за всю историю квантовой электродинамики. Все это он сделал в поезде по дороге из города Итака, штат Нью-Йорк, в город Скенектеди, откуда он взволнованно позвонил мне, чтобы рассказать о своем результате, который я тогда, кажется, не оценил по достоинству.

Вернувшись в Корнельский университет, он прочел об этом доклад, на котором я присутствовал. На докладе он рассказал, как трудно не сбиться и не упустить из виду, чему соответствует каждый бесконечный член, когда пытаешься вводить поправки на бесконечно большие изменения массы. Вот если бы существовала какая-нибудь модификация метода, говорил проф. Бете, хотя бы даже физически не оправданная (т. е. не обязательно соответствующая тому, что происходит в природе), любая модификация, при которой эти поправки на высоких частотах окажутся конечными, тогда все проблемы будут сразу разрешены и можно будет безо всякого труда следить за всем происходящим. Вам нужно будет лишь вычислить конечную поправку Δm к массе электрона m_0 , подставить численное значение $m_0 + \Delta m$ вместо m в решение любой другой задачи, и все эти неопределенности будут разрешены. Если же такой метод оказался бы еще и релятивистски инвариантным, то мы могли бы быть абсолютно спокойны относительно релятивистской инвариантности.

После лекции я подошел к проф. Бете и сказал ему: «Я знаю, как делать то, о чем вы говорили, и расскажу вам об этом завтра». Я был уверен, что знаю все возможные способы модификации квантовой электродинамики, известные в то время кому бы то ни было. На следующий день я пришел к проф. Бете и рассказал ему, что получилось бы при замене дельта-функции на f , после чего попросил его объяснить, как вычислять собственную энергию, например, электрона, чтобы мы могли убедиться, конечна ли она.

Вот что интересно. Я совсем не следовал совету проф. Йеле — всегда искать, как то или иное можно использовать. Я еще ни разу не попытался решить ни одной релятивистской задачи при помощи всего того аппарата, который я соорудил. Я даже

еще не вычислял собственной энергии электрона, а занимался лишь исследованием тех трудностей, которые возникают из-за нарушения принципа сохранения вероятности и тому подобного, т. е. практически не решал никаких настоящих задач, а только разбирался в самых общих вопросах теории.

Но теперь я пришел к проф. Бете, и он по ходу дела показал мне на доске, как вычислять собственную энергию электрона. В то время интегралы в соответствующих расчетах оказывались логарифмически расходящимися. Я же рассказал ему, как можно релятивистски инвариантным образом модифицировать квантовую электродинамику, чтобы в результате не было никаких расходимостей. Мы произвели необходимые выкладки и вместо интеграла, который расходился как логарифм, получили другой интеграл... расходившийся как шестая степень!

Мне ничего не оставалось, как вернуться к себе домой. Я стал ломать голову над тем, что произошло, прикидывая и так и этак, в чем же тут дело, в чем причина неудачи, так как в физической стороне вопроса для меня не было сомнения — все должно было получиться конечным. Я просто представить себе не мог, как у меня получилась бесконечность. Задача казалась мне все более и более интересной, и, наконец, я пришел к мысли, что мне нужно научиться самому считать. И вот, мало-помалу я научился вычислять собственную энергию электрона, терпеливо пробираясь через тогдашние непроходимые джунгли состояний с отрицательной энергией, теории дырок, продольных поправок и т. п. Когда же, наконец, я разобрался в том, как это нужно делать, и вычислил эту энергию при тех видоизменениях теории, которые мне хотелось предложить, оказалось, что все самым чудесным образом сходится и оказывается конечным, как я и предполагал с самого начала. Проф. Бете и я так потом и не смогли сообразить, где же мы тогда, два месяца тому назад, ошиблись, вычисляя интеграл на доске. Но, по-видимому, мы просто где-то сбились, а где — этого нам так и не удалось выяснить. Оказалось, что если выполнить все то, что я предлагал, и не делать при этом ошибок, то все прекрасно получается и поправка оказывается конечной. Так или иначе, это приключение заставило меня еще раз просмотреть всю мою теорию и еще раз убедиться в том, что с физической точки зрения здесь все безупречно. По крайней мере теперь мы получили конечную поправку для массы, пропорциональную $\ln(ma/\hbar)$, где a — ширина той функции f , которую мы подставляли вместо δ . Если вам нужно было вернуться к исходной электродинамике, то достаточно было положить a равным нулю, и вы сразу получали бесконечную поправку для массы. Но дело было не в этом. Сохраняя a конечным, я без особого труда выполнил программу, набросанную проф. Бете, и показал, как вычислять самые разные вещи: рассеяние электронов на атоме без излучения, сдвиги уровней энергии и тому подобное, — и все это через экспериментальную массу, причем результаты, как и предсказывал Бете, не зависят от параметра a и даже имеют вполне определенный предел при $a \rightarrow 0$.

Остальная часть моей работы состояла лишь в том, чтобы усовершенствовать существовавшие тогда методы расчетов, используя диаграммы, которые позволяли бы быстрее вести исследования методами теории возмущений. Почти все это сначала было лишь удачными догадками — ведь у меня не было удовлетворительной релятивистской теории материи. Например, мне казалось очевидным, что в нерелятивистских формулах скорости необходимо заменять матрицей Дирака α или, в более релятивистской форме, оператором γ_μ . Я основывал свои догадки на том, какой вид имеют результаты, полученные при помощи интегралов по путям для нерелятивистских частиц, но релятивистского света. Составить правила, показывающие, что подставлять для того, чтобы перейти к релятивистскому случаю, было уже нетрудно. Я был очень удивлен, когда выяснил, что в то время не знали, что любую формулу, терпеливо выведенную с соблюдением разделения волн

на продольные и поперечные, можно получить из формул, описывающих только поперечные волны, если вместо того, чтобы суммировать лишь по двум взаимно перпендикулярным направлениям поляризации, перейти к суммированию по всем четырем направлениям поляризации. Этот результат был настолько очевиден из выражения (1), что я считал его общеизвестным и постоянно пользовался им. Я ввязывался в бесконечные споры, так как не понимал, что мои собеседники не знают этого. Но в конце концов вся их кропотливая работа с продольными волнами всегда давала тот же результат, что и простое суммирование не по двум поперечным направлениям поляризации, а по всем четырем направлениям. В этом заключалось одно любопытное преимущество данного метода. Кроме того, я добавил диаграммы для различных членов ряда теории возмущений, улучшенную систему обозначений, выработал простые правила вычисления интегралов, встречающихся при решении подобных задач и т. д., и составил нечто вроде руководства по квантовой электродинамике.

Правда, один важный шаг был новым с физической точки зрения. Дело в том, что мне доставило массу логических трудностей дираковское море состояний с отрицательной энергией. Я почти совсем запутался и тогда вспомнил старую идею Уилера о том, что позитрон — это электрон, возвращающийся из будущего в прошлое. В теории возмущений, учитывающей зависимость от времени, используемой обычно при вычислении собственной энергии, я просто предположил, что мы можем пятиться во времени, и посмотрел, каковы же будут соответствующие члены, если изменять переменную — время — в обратном направлении. У меня получились те же самые, с точностью, может быть, до некоторых знаков, выражения, что и у других, решавших эти задачи более сложным способом на основе теории дырок. Знаки же я сначала определял чисто эмпирическим путем, придумав и испробовав для этого особые правила.

Я старался показать вам, что вначале все эти усовершенствования релятивистской теории были лишь более или менее очевидным полуэмпирическим ухищрением. Но всякий раз, когда я находил что-нибудь новое, я возвращался назад, проверял себя на всевозможных решенных задачах электродинамики (а позже и мезонной теории со слабой связью), убеждался в полном согласии старых и новых результатов, пока, наконец, я не был абсолютно уверен в справедливости каждого правила и каждого предписания, которые я выдумывал для облегчения работы.

Тем временем в физике рождалась другая, мезонная, теория — теория, которой я практически не занимался. Меня заинтересовала возможность применения моего подхода к теории возмущений в этой новой мезонной теории. Но что же это была за теория? Я знал только, что мезонная теория похожа на электродинамику. Правда, в этой теории у частиц, соответствующих фотону электродинамики, была масса. Ну, это было не страшно. Достаточно, наверное, заменить в формуле (1) дельта-функцию, т. е. решение уравнения, в котором соответствующий даламбертиан приравнивается нулю, решением другого уравнения, требующего, чтобы этот даламбертиан равнялся m^2 . Я слышал также, что мезоны бывают разных типов: одни со связью γ_μ и больше всего напоминающие фотоны, их называют векторными, а другие — скалярные. Может быть, это соответствует подстановке единицы вместо матрицы γ_μ , которую, кажется, называют «псевдовекторной связью». И я старался догадаться, что бы это могло значить. А для того чтобы действительно разобраться по имевшейся литературе в том, что же означают все эти понятия, мне попросту не хватало знаний, так как в тогдашней теории все эти понятия определялись при помощи операторов рождения и уничтожения частиц, в которых я очень слабо разбирался. Помню, что как только кто-то начал рассказывать мне об опера-

торах рождения и уничтожения, о том, что первый из них порождает электрон, я сразу возразил: «Как это можно породить электрон? Ведь тогда нарушится закон сохранения заряда», — и с того момента у меня появилось предубеждение против этой исключительно полезной с практической точки зрения методики расчетов. Поэтому мне нужно было не упускать ни одного удобного случая, чтобы еще и еще раз проверить, правильно ли я угадал смысл разных теорий.

Однажды на заседании Физического общества разгорелся спор о правильности расчетов взаимодействия электрона с нейтроном, выполненных Слотником на основе псевдоскалярной теории с псевдовекторной связью, а также псевдоскалярной теории с псевдоскалярной связью. Слотник обнаружил, что результаты того и другого расчета не одинаковы. Оказалось даже, что одна теория приводит к расходящемуся результату, а другая — к сходящемуся. В то же время некоторые считали, что обе теории должны давать для этой задачи одинаковые решения. Это было то, что мне нужно, я мог проверить свои догадки и выяснить, действительно ли я понимаю, в чем сущность этих двух типов связей. И вот я отправился домой и за один вечер решил задачу электронного рассеяния на нейтронах для случаев псевдоскалярной и псевдовекторной связей, нашел, что решения не совпадают, вычел одно из другого и подробно исследовал разность. На следующий день на заседании общества я встретил Слотника и сказал ему: «Знаете, вчера вечером я решил вашу задачу. Мне хотелось посмотреть, получится у меня то же, что и у вас, или нет. У меня, как и у вас, получился разный ответ для разных типов связей, но мне хотелось бы подробно просмотреть мое решение вместе с вами, потому что я хотел бы убедиться в правильности моего метода». — «Как это вчера вечером? — изумился Слотник. — У меня на это ушло шесть месяцев». А когда мы стали сравнивать результаты и он увидел мой, он спросил: «А что это за Q ? Вот эта переменная Q ?» [У меня были выражения вида $(\arctg Q)/Q$ и т. д.] Я ему объясняю: « Q — это импульс, переданный электроном. Ведь электрон может рассеиваться под разными углами». — «Ага, — говорит Слотник, — так у меня ведь только предельный случай, когда Q стремится к нулю, только случай рассеяния вперед». Подставить нуль вместо Q в мои выражения было нетрудно, а в результате получились ответы, совпадающие с ответами Слотника. Но у него ушло шесть месяцев на то, чтобы решить задачу без учета передачи импульса, а я решил задачу при произвольной и конечной передаче импульса за один вечер. Это был волнующий момент, все равно как вручение Нобелевской премии, так как я наконец убедился в том, что у меня в самом деле есть стоящий метод и я знаю, как решать задачи, которых не умеют решать другие. Это был мой триумф, я понял, что работал не напрасно.

Вскоре меня уговорили опубликовать свои результаты: такой способ проводить расчеты всем казался простым и все хотели научиться, как это делать. Мне пришлось опубликовать их, хотя в работе и были два пробела. Во-первых, мне не хватало доказательств всех утверждений в обычном математическом смысле слова. Часто у меня не было даже физического обоснования связи всех этих правил и уравнений с обычной электродинамикой. Но я знал по своему собственному опыту, из своего рысканья вокруг да около, что все это эквивалентно-таки обычной электродинамике. Кроме того, у меня был целый ряд частичных доказательств отдельных положений, хотя я так и не собрался засесть за работу по-настоящему и показать, как это сделал Евклид для геометров Древней Греции, что все можно вывести из одного простого набора аксиом. В общем работу много критиковали, не знаю, благосклонно или нет, а предлагаемый «метод» называли «интуитивным». Но если кто-нибудь не понял, я еще раз подчеркну — для того чтобы успешно пользоваться таким «интуитивным методом», требуется колоссальная работа. Ведь поскольку простых и ясных доказательств теорем или выводов формул нет, каж-

дый раз приходится снова и снова проверять полученные результаты, исследуя их непротиворечивость и правильность на уже изученном ранее материале, сравнивая с результатами исследований сходных ситуаций, рассматривая предельные случаи и т. д. При отсутствии прямых математических доказательств необходимо быть предельно внимательным, работать необыкновенно тщательно, стараться показать справедливость каждой отдельной формулы. И тем не менее дельного в том, что мы знаем, может оказаться гораздо больше, чем это можно доказать.

Надеюсь, вы хорошо поняли, что на протяжении всей этой работы я пользовался самой обычной электродинамикой с запаздывающими воздействиями, а не моей теорией с наполовину опережающими и наполовину запаздывающими воздействиями, основывающейся на выражении (1). Формулой (1) я пользовался лишь для того, чтобы угадать форму выражений. Одна из таких угаданных форм соответствовала замене δ на функцию f шириной a^2 , что позволило мне получить конечные результаты для любых задач. И здесь-то мы приходим ко второму пробелу в моей опубликованной работе, другой неразрешенной проблеме. При замене δ на f результаты не получаются «унитарными», т. е. для них сумма вероятностей всех альтернативных вариантов оказывается меньше единицы. На практике отклонение от единицы очень невелико, если a достаточно мало. В пределе при очень малом a оно вообще несущественно. А это позволяет выполнять перенормировку: вы можете вычислить все через эмпирическую массу, а затем перейти к пределу, и в результате очевидное затруднение, связанное с нарушением унитарности, вроде бы временно отпадает. Что оно действительно отпадает, мне так и не удалось показать.

Я хорошо сделал, что не стал откладывать публикацию до выяснения этого вопроса, так как ответа на него, насколько мне известно, никто еще не смог найти. Опыт исследования мезонных теорий с более сильными связями и сильно связанными векторными фотонами хотя и ничего не доказывает, но все же убеждает меня в том, что при более сильной связи или в более высоком приближении (скажем, в приближении 137-го порядка теории возмущений для электродинамики) эта трудность не исчезнет при переходе к пределу и действительно будет камнем преткновения. Я хочу сказать, что, по-моему, сейчас у нас нет удовлетворительной квантовой электродинамики, хотя я и не уверен в этом до самого конца. И, мне кажется, исследования сильных взаимодействий продвигаются вперед в последнее время такими медленными темпами, в частности, из-за того, что у нас нет релятивистской теоретической модели, которая позволяла бы действительно рассчитывать все, что нам нужно. Хотя чаще всего можно слышать, что основным препятствием служит чрезмерная трудность решения задач теории *сильного* взаимодействия, мне лично кажется, что дело не в этом, а в том, что эти задачи в рамках теории поля вообще не имеют решения, они просто бессмысленны в этом контексте: либо вы получаете бесконечные решения, либо, если вы пытаетесь как-то видоизменить их, это изменение приводит к нарушению унитарности. Я думаю, что у нас нет совершенно удовлетворительной модели релятивистской квантовой механики, которая согласовалась бы если не с явлениями природы, то по крайней мере с элементарной логикой, требующей, чтобы сумма вероятностей всех альтернатив составляла 100%. Вот почему я лично считаю, что теория перенормировки — это просто один из способов заметать под ковер трудности электродинамики, связанные с расходимостью. Но, конечно, у меня нет в этом абсолютной уверенности.

На этом можно закончить рассказ о разработке квантовой электродинамики в пространственно-временном аспекте. Не знаю, может ли он чему-нибудь научить. Вряд ли. Ведь самое удивительное то, что почти все идеи, возникшие в процессе исследования, в конце концов оказались ненужными для конечного результата.

Например, мне не понадобились наполовину запаздывающие и наполовину опережающие потенциалы. Выражением (1) для действия я не пользовался. Мысль о том, что заряды не действуют на самих себя, пришлось оставить. Правда, квантовомеханический формализм, базирующийся на интегралах по путям, оказался полезным для отгадывания окончательных результатов и для формулировки новой теории электродинамики, но даже это не было совершенно необходимым. То же самое можно сказать и о позитроне как пятящемся электроне. Такое представление было очень удобным, но, строго говоря, и без него можно было обойтись, ибо оно приводит к тем же самым результатам, что и теория дырок в море отрицательных энергий.

Конечно, нас очень удивляет такое богатство различных физических точек зрения и столь различных математических формулировок, оказывающихся тем не менее эквивалентными. Поэтому метод, которым я пользовался, основанный на физических соображениях, кажется крайне неэффективным. Оглядываясь на проделанную работу, я не могу не почувствовать своего рода сожаления по поводу того необыкновенного количества физических идей и математических формулировок, приведших в конце концов лишь к математическому преобразованию того, что уже было известно ранее, хотя в новой формулировке гораздо легче решать те или иные конкретные задачи. Разве не было бы намного проще работать исключительно над математическим аппаратом в поисках более эффективных процедур решения? Так-то оно так, но нельзя забывать, что, хотя все и свелось лишь к переформулировке уже известного, начал-то я с задачи (возможно, и до сих пор нерешенной) о том, как устранить бесконечности в обычной теории. Значит, я искал новую теорию, а не просто модификацию старой. И хотя поиск оказался безуспешным, это не решает вопроса о том, какую ценность представляют физические соображения при создании *новой* теории.

Одну и ту же физическую реальность можно представлять себе по-разному. Так, классическую электродинамику можно построить или на основе понятия поля, или на основе представления о действии на расстоянии, или еще каким-нибудь другим образом. В свое время Максвелл заполнил пространство шестеренками, а Фарадей — силовыми линиями, но так или иначе сами уравнения Максвелла остаются в своем изначальном виде и не меняются в зависимости от тех слов, при помощи которых пытаются вдохнуть в них физическое содержание. Единственное действительно физическое описание явления — это истолкование смысла величин в уравнении с точки зрения эксперимента, или, точнее говоря, способ применения уравнений к результатам эксперимента. А раз так, то, наверное, наилучший способ создания новой теории — угадывать уравнения, не обращая внимания на физические модели или физическое объяснение. Например, Максвелл угадал правильные уравнения для распространения света в кристалле задолго до того, как его коллеги, пользуясь упругими моделями, придумали мало-мальски правдоподобное объяснение этого явления. Или тот же Дирак, который предложил свое уравнение для описания электрона, основываясь практически только на чисто математических соображениях. И по сей день для этого уравнения нет простого физического объяснения, охватывающего все его стороны.

Вот почему я думаю, что угадывание уравнений может быть наилучшим способом получения законов для тех областей физики, которые еще мало изучены. Правда, когда я был намного моложе, я сам пробовал угадывать уравнения и видел многих студентов, занимавшихся этим. И я знаю, что на таком пути очень легко сбиться и пойти в самом невероятном направлении. Поэтому мне кажется, что дело не в том, чтобы найти самый *лучший* или самый эффективный способ делать открытия, а в том, чтобы найти хоть какой-нибудь. Физические же соображения

помогают иногда генерировать идею о том, как неизвестное может быть связано с известным. Теории известного, основанные на разных физических представлениях, могут быть совершенно эквивалентными во всех своих выводах, а потому неразличимыми в научном отношении. Но они не идентичны психологически, когда мы пытаемся, оттолкнувшись от них, шагнуть в неизвестное. Ведь с разных точек зрения можно усмотреть разные возможности для модификаций, а потому такие точки зрения не эквивалентны со стороны тех гипотез, которые выдвигают люди, пытаясь разобраться в том, что им пока еще не понятно. Вот почему я уверен, что любому хорошему современному физику-теоретику полезно было бы иметь широкий диапазон различных физических точек зрения на одну и ту же теорию (например, квантовую электродинамику) и знать большое число ее математических формулировок. Правда, может быть, это значит требовать от одного человека слишком многого. Но тогда такими знаниями должны обладать новые ученые, взятые все вместе, как класс. Если каждый ученый станет следовать общей моде своего времени на описание и объяснение электродинамики или теории поля, то число гипотез, которые можно выдвинуть для объяснения, скажем, сильных взаимодействий, окажется ограниченным. Может быть, это вполне оправдано, потому что истина может лежать как раз в модном направлении. Но если ее можно найти лишь на другом пути — на пути, очевидном с непопулярной точки зрения в теории поля, кто же найдет ее тогда? Только тот, кто пожертвует собой, изучая квантовую электродинамику с необычной и странной точки зрения, которую, возможно, ему самому придется придумать. И я говорю «пожертвовать собой», потому что, вероятнее всего, это никуда его не приведет, ведь истина может быть совсем не здесь и очень может быть там, где царит мода.

Но, насколько можно судить по моему опыту, жертва здесь не слишком велика, так как если необычная точка зрения действительно экспериментально эквивалентна общепринятой в области известного, в этой области всегда найдется круг задач и приложений, в которых необычная точка зрения придает особую силу и ясность мысли, что уже само по себе очень ценно. К тому же, занимаясь поисками новых законов, вы постоянно испытываете душевный подъем от мысли, что, может быть, никто еще не додумался до той невероятной возможности, которую вы сейчас рассматриваете.

А что же стало со старой теорией, в которую я влюбился еще юношей? Она теперь стала почтенной старой дамой, почти совсем потерявшей былую привлекательность. Сердце юноши уж не забьется учащенно при виде ее. Но о ней можно сказать самое лучшее, что можно сказать о пожилой женщине: что она очень хорошая мать и у нее очень хорошие дети. И я благодарен Шведской Академии наук за высокую оценку одного из них.

Благодарю вас за внимание.