

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

53(09)

ВОСПОМИНАНИЯ О НЕОБЫЧАЙНОЙ ЭПОХЕ*)

П.А.М. Дирак

I

Я счастлив был приехать в Варенну на Вашу летнюю школу. Я многому здесь научился: я не только узнал на лекциях о разных фактах из истории науки, но и научился воспринимать точку зрения историка науки. Она на самом деле резко отличается от точки зрения физика-исследователя. Физик, если он что-то открыл, занимает обретенные позиции и уже с них обозревает открывшиеся перед ним просторы. Он задает себе вопрос: «Куда отсюда идти дальше? Какие применения можно найти этому новому открытию? Сколько далеко можно с его помощью продвинуться в решении тех задач, которые продолжают стоять перед нами? Какие из этих задач самые важные?»

Физик предпочитает забыть путь, который привел его к открытию. Он шел по извилистой дороге, сворачивая на ложные тропы — об этом не хочется теперь даже вспоминать. Ему, может быть, даже стыдно, он разочарован собой, тем, что он так долго возился. «Сколько времени я потерял, пойдя по такому пути,— говорит он сам себе.— Я же должен был сразу понять, что эта дорога никуда не ведет». Когда открытие уже сделано, оно обычно кажется таким очевидным, что остается лишь удивляться, как никто не додумался до этого раньше. В таких условиях никому не захочется вспоминать о той работе, которая привела к открытию.

Но это все просто противоречит желанию историка науки. Он хочет узнать о различных влияниях на работу, о промежуточных этапах, и его порой интересуют даже ложные тропинки. Это две несовместимые точки зрения. Большую часть своей жизни я прожил как физик-исследователь, а это означает, что все промежуточные этапы я должен был забыть как можно скорее.

Тем не менее, когда я понял, чем занимается история науки, я попытался представить себе прошлое и приложил все силы к тому, чтобы вспомнить о разных событиях, которые произошли 50 лет назад. Я попытался восстановить в памяти, что на меня тогда влияло, какую роль сыграли в моей жизни учителя и то образование, которое я получил, и как все это вместе взятое вылилось в мой стиль работы, которому я следовал потом всю жизнь.

*) Dirac P. A. M. Recollections of an Exciting Era//History of Twentieth Century Physics: Proceedings of the International [Summer] School of Physics «Enrico Fermi». Course LVII. Varenna, Lake Como, Italy, villa Monastero, July 31 — August 12, 1972.— (Rendiconti S. I. F. — LVII).— New York: Academic Press, 1977.— P. 109—146.— Перевод Н. Я. Смородинской.

© Academic Press 1977

© Перевод на русский язык и список литературы, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1987

Я озаглавил свою статью «Воспоминания о необычайной эпохе». Началом этой эпохи следует считать 1919 г. Тогда произошло удивительное событие. В мир сокрушительной силой ворвалась теория относительности. О ней неожиданно заговорили все. В газетах было полно сообщений о теории относительности. Журналы печатали статьи разных авторов. Одни выступали за теорию относительности, но были и такие, которые выступали против. Теорию относительности понимали тогда в очень широком смысле — ее взяли на вооружение и философы, и люди других, самых разных профессий.

Нетрудно понять причину столь головокружительного успеха. Мы тогда только что пережили очень серьезную и страшную войну. В каком-то смысле она оказалась довольно странной. Общая картина военных действий изменилась не очень существенно, но нельзя было забывать и большие потери, о которых все время сообщалось в газетах. Многочисленные наступления почти не меняли положение линии фронта, может быть, перемещая ее вперед или назад на несколько сот ярдов — и это было все.

Потом эта жуткая война совершенно неожиданно пришла к концу. В результате все устали. Хотелось бы о ней забыть. И тогда возникла теория относительности, замечательная идея, открывавшая дорогу к новому образу мышления. В этом было бегство от войны. Мне кажется, что ни до ни после ни одна научная мысль, которой удавалось завладеть умами широкой публики, не производила равного по своей силе эффекта.

Этот эффект происходил одновременно и от специальной, и от общей теории относительности. На самом деле, специальная теория относительности восходила к 1905 г. и была значительно старше. Тем не менее, кроме нескольких университетских специалистов о ней никто ничего не знал. Обыватель никогда не слышал об Эйнштейне, и вдруг имя Эйнштейна оказалось у всех на устах. Но Эйнштейн жил где-то далеко, в чужой стране, а человеком, чье присутствие ощущалось реальнее, стал Эддингтон. В Англии того времени Эддингтон пользовался огромным авторитетом и был лидером релятивизма. Его слушали всегда с большим уважением и считали главным толкователем относительности. Эйнштейн же оставался на заднем плане.

Я тогда учился на инженерном факультете Бристольского университета и, конечно же, был охвачен общим возбуждением, которое породила теория относительности. Мы очень много говорили о ней. Студенты обсуждали теорию относительности друг с другом, но дальше этого не шли из-за недостатка точной информации. Теория относительности была той областью, в которой каждый считал себя достаточно компетентным, чтобы высказываться в общефилософском духе. Философы, например, просто выдвинули точку зрения, что все следует рассматривать относительно чего-то, и, кроме того, они заявляли, что теория относительности была им всегда известна.

Представление о выходивших тогда статьях по теории относительности можно почертнуть из доклада Холтона¹. Он прочел отрывок из сочинений сэра Оливера Лоджа, который весьма критически воспринимал теорию относительности. Ясно, что в сочинениях такого стиля не содержится никаких точных утверждений, и поэтому мы, студенты инженерного факультета, были вовлечены в дискуссию, о предмете которой у нас почти не было достоверных сведений.

Кое-какую точную информацию я впервые получил, слушая курс лекций Броуда. Броуд был философом и смотрел на вещи с философской точки зрения. В то время он читал лекции по философии в Бристольском университете. Потом он стал профессором Кембриджского университета и умер всего несколько лет назад. Броуд читал курс из десяти или двенадцати лекций, в которых он рассматривал теорию относительности с философских позиций. Несколько студентов инженерного факультета сначала ходили на эти лекции, но потом они отселились. Я выдержал до конца, изо всех сил пытаясь понять философию. Мои сокурсники инженеры, обладавшие сугубо практическим взглядом на вещи, решили, что инженеру не нужны философские проблемы,

и перестали ходить на лекции. Мне, однако, казалось, что в философии что-то есть, и я прилагал все усилия к тому, чтобы разобраться в точке зрения, на которой стоят философы. Кроме того, я немного почитал о философии. Я прочел от начала до конца «Систему логики» Миллса.²

Тем не менее, мои попытки понять философию были не слишком успешны. Все, что говорили философы, казалось мне довольно неопределенным, и я в конце концов пришел к заключению, что не считаю философию наукой, которая может способствовать развитию физики. Эта точка зрения возникла у меня далеко не сразу. Я пришел к ней после долгих размышлений над тем, что говорили философы, и, в частности, над тем, что говорил Броуд.

Надо сказать, что он не только рассказывал об общем философском подходе, но и дал кое-какую точную информацию как о специальной, так и об общей теории относительности. Я помню, как Броуд (на второй или на третьей лекции) написал на доске такую формулу

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2. \quad (1)$$

Знак минус произвел на меня огромное впечатление. Я сразу понял, что в этой формуле есть что-то новое. Причина столь сильного эффекта, может быть, крылась в том, что в школе меня очень интересовала связь пространства и времени. Немало поразмышляв над этим, я понял, что время очень похоже на любое другое измерение, и тогда мне пришло в голову, что между пространством и временем может существовать какая-то связь и что эти объекты следует рассматривать в общем четырехмерном виде.

Однако единственной известной мне тогда геометрией, была геометрия Евклида, и если между пространством и временем и существовало какое-нибудь соотношение, то обе эти величины должны были бы входить в него со знаком «плюс». Нетрудно понять, что такой подход неправилен, потому что сколько-нибудь большое изменение в координате времени приведет к абсурду.

Пожалуй, стоит пояснить, что я всегда очень интересовался геометрией. Она была той областью математики, которая меня просто зачаровывала. Всех математиков можно разделить на два класса: одни интересуются главным образом геометрией, а другие — алгеброй. Это деление в заметной степени связано с делением на Запад и Восток. Интерес тех, кто получил европейское образование, тяготеет к геометрии, следя древней школе греков. Те же, чьи интересы направлены на алгебру, примыкают к народам Азии, следя по пути, начатому созданием самой алгебры.

В наше время хороший математик должен хорошо владеть и алгеброй, и геометрией. Он должен уметь свободно переходить как от алгебры к геометрии, так и обратно, в зависимости от природы той задачи, которой он занимается. Но человек всегда отдает предпочтение какому-либо одному способу мышления, и я всегда был на стороне геометрии. Так это сохраняется и сейчас.

Формула, написанная Броудом на доске, несомненно, открыла мне новый взгляд на геометрию. Я вспоминаю, что еще в школе один из учителей математики сказал, что меня, наверное, заинтересует неевклидова геометрия, и посоветовал мне прочесть несколько книг на эту тему. Однако они меня не заинтересовали. Дело в том, что меня занимал реальный физический мир, и я считал совершенно очевидным, что в его основе лежит евклидова геометрия. Поэтому не было нужды рассматривать никакую другую геометрию. Меня абсолютно не трогали чисто логические рассуждения или возможности, которые открывались при рассмотрении какого-нибудь другого набора аксиом. И это мое стремление также осталось со мной на всю жизнь. Я интересовался реальным физическим миром, а не вопросами чистой логики. Такой интерес к реальному миру, естественно, опирался на то инженерное образование, которое я получил.

Теперь, приобретя новый взгляд на мир, возникший из формулы, которую написал на доске Броуд, я вскоре смог сам выводить основные уравнения специальной теории относительности.

Итак, я окончил инженерный факультет и я попытаюсь объяснить, как на меня повлияло инженерное образование. Впоследствии мне не приходилось пользоваться конкретными методами, которым нас учили, но само обучение очень сильно изменило мое мировоззрение. Раньше я видел смысл лишь в точных уравнениях. Мне казалось, что если пользоваться приближенными методами, то работа становится невыносимо уродливой, в то время как мне страстно хотелось сохранить математическую красоту. Инженерное образование, которое я получил, как раз научило меня смиряться с приближенными методами, и я обнаружил, что даже в теориях, основанных на приближениях, можно увидеть достаточно много красоты. Возьмем такую задачу: размещение намотки в роторе динамомашины. Решение этой задачи связано с математикой, которая, оперируя лишь целыми числами, все же обладает определенной красотой.

Таким образом, мои взгляды стали совсем другими. Они поменялись еще больше, скорее всего, под влиянием теории относительности. Вначале я считал, что существуют точные законы Природы и все, что надо делать,— это получать из них следствия. Типичным примером точных законов являются законы движения Ньютона. Но мы узнали, что эти законы не точные, а приближенные, и я заподозрил, что может быть, все остальные законы Природы тоже лишь приближения. Я оказался вполне подготовленным к тому, что все наши уравнения надо рассматривать как приближения, отражающие существующий уровень знаний, и воспринимать их как призыв к попыткам их усовершенствования.

Если бы не инженерное образование, я, наверное никогда не добился бы успеха в своей последующей деятельности, потому что достижение успеха требовало отказа отточки зрения, что следует иметь дело лишь с точными уравнениями и результатами, получаемыми логически из принятых на веру известных точных законов. Инженеры занимались поиском уравнений, пригодных для описания Природы. Им не было дела до того, как эти уравнения были получены. Отыскав уравнения, инженер брался за логарифмическую линейку и получал необходимые ему результаты.

Все сказанное убедило меня, что инженерный подход является наилучшим. Мы стремились к описанию Природы. Нам хотелось найти уравнения, которые давали бы описание Природы, и лучшим, на что можно было рассчитывать, оказывались обычно приближенные уравнения. Приходилось смиряться с отсутствием строгой логики и ограничивать себя придумыванием уравнений, которые были способны описывать Природу.

После того как кончился инженерный курс, я остался еще на два года в Бристольском университете для изучения математики. В течение этого времени человеком, который оказал на меня наибольшее влияние, был Фрейзер. Фрейзер был математиком, никогда не занимавшимся исследовательской работой и никогда ничего не опубликовавшим, но он оказался несравненным учителем, который умел разбудить в своих учениках неподдельный интерес к изучению основ математики. Я думаю, что сейчас он уже совершенно забыт. Правда, после его смерти Ходж опубликовал в журнале Лондонского математического общества некролог³. В этом некрологе Ходж воздавал хвалу Фрейзеру как великому педагогу.

Фрейзер научил меня двум вещам. Во-первых, он научил меня строгости математики. Прежде я прибегал только к нестрогим рассуждениям, которые вполне удовлетворяли инженеров, стремившихся лишь к практическим результатам. Им было безразлично, как выглядит точное определение предела и как суммируются ряды и другие вещи того же рода. Фрейзер же учил нас, что иногда анализ таких задач требует строгих логических рассуждений.

Надо сказать, что в последующей работе я продолжал все же пользоваться нестрогой математикой для инженеров. Вы увидите, что большая часть моих работ действительно содержит нестрогие рассуждения. Вводя ту или иную функцию, я никогда не говорю, является ли она непрерывной или дифференцируемой, и не налагаю на нее всех тех условий, которые необходимы «чистому» математику до того, как он сможет сделать какие-либо утверждения. Я просто считаю, что это именно такая функция, которая интересна физику.

Однако подобный нестрогий математический подход пригоден не всегда. В моей жизни было несколько случаев, когда работа неожиданно застопоривалась из-за того, что возникла необходимость в более корректных определениях для поиска источника ошибки, к которой могла привести нестрогая математика.

Вторым, что я узнал от Фрейзера, была проективная геометрия. Она произвела на меня сильнейшее впечатление, благодаря своему математическому изяществу. Кроме того, методы проективной геометрии обладают огромными возможностями. Мне кажется, что в большинстве своем физики очень мало знают о проективной геометрии, и я бы сказал, что это пробел в их образовании. Проективная геометрия всегда имеет дело с плоским пространством, но она представляет собой, мощнейший инструмент для изучения плоского пространства и вооружает нас методами, например, методом одноднозначных соответствий, которые как по волшебству выдают результаты. Теоремы евклидовой геометрии, над которыми мы долго бились, оказываются очень простыми, как только вы воспользуетесь соображениями проективной геометрии.

Я всегда стремился к красоте в математике, поэтому знакомство с проективной геометрией оказалось для меня очень сильным стимулом, и мой интерес к ней сохранился на всю жизнь.

Вам может показаться, что проективная геометрия не очень нужна физикам, но это неверно. В современной физике очень часто используется пространство Минковского. Представьте себе, что вам надо записать соотношения в пространстве Минковского, соотношения, связывающие между собой векторы и тензоры. Нередко это лучше всего получается в терминах проективной геометрии. В своей работе я всегда прибегал к соображениям проективной геометрии. Если вам нужно понять, что происходит с некоторой величиной при преобразовании Лоренца, то нередко самый лучший способ решения этой задачи дает проективная геометрия.

Проективная геометрия представляла собой необыкновенно полезный аппарат для исследований, но я ничего не писал о ней. Мне кажется, что я никогда даже не упомянул о ней в статьях (хотя я не совсем в этом уверен), ибо понимал, что большинство физиков плохо ее знают. Получив какой-нибудь результат, я переводил его на аналитический язык и превращал свои аргументы в уравнения. Такое доказательство мог понять любой физик, не получивший специальной подготовки.

Однако, когда человек начинает работать в какой-нибудь новой области и еще не знает, что его ждет, ему бывает необходимо отчетливо представлять себе предмет исследования. Вот для этих целей проективная геометрия и подходит больше всего.

Все сказанное относится и к моим работам о спинорах. Мы должны были работать с величинами совсем нового типа, но и здесь лучший инструмент для исследования дает нам проективная геометрия.

Итак, в течение двух лет я изучал в Бристоле математику, после чего продолжил образование в качестве аспиранта в Кембридже. В Кембридже каждый аспирант имел руководителя, который должен был следить за тем, как аспирант работает, давать ему задачи и вообще интересоваться его занятиями и помогать в работе.

Моим руководителем стал Р. Г. Фаулер — еще один человек, оказавший на меня огромное влияние. Вначале я был несколько разочарован тем, что

Фаулера назначили моим руководителем. Дело в том, что меня в основном интересовали геометрические задачи и особенно теория относительности, которой Фаулер не занимался. В Кембридже тогда работал Каннингхэм. Он хорошо знал специальную теорию относительности и в 1910 году написал на эту тему книгу⁴. Однако Каннингхэм не хотел больше брать аспирантов, и поэтому я попал к Фаулеру.

Вскоре мне стало ясно, что налет разочарования, испытанного мной вначале, был совершенно неоправданным. Фаулер вовлек меня в совсем новое поле деятельности, познакомив с атомом Резерфорда, Бора и Зоммерфельда. Прежде я ничего не слышал о теории Бора. У меня как бы открылись глаза. Казалось совершенно непостижимым, как уравнения классической электродинамики можно применять к атому. Я всегда считал, что атомы являются некоторыми совершенно гипотетическими объектами, а здесь, в Кембридже, физики работали с уравнениями, которые на самом деле описывали строение атома.

Я очень быстро попал в самый центр проблем, связанных с изучением атомов. Самой сложной была задача о том, почему электронные орбиты стабильны. Почему электроны попросту не падают внутрь ядра, как это следует из классической механики?

Со всей настойчивостью я принялся размышлять над этими проблемами, занимаясь одновременно и другими вопросами математики.

Продолжая интересоваться теорией относительности, я изучил классическую книгу Эддингтона «Математическая теория относительности»⁵. Сначала книжка показалась мне довольно трудной, но в конце концов я справился с ней. Я был очень рад, что Эддингтон существовал поблизости. Мы изредка встречались и обсуждали проблему кинематической и динамической скорости, результатом чего была моя маленькая заметка, опубликованная в журнале «Philosophical Magazine»⁶. Я был в восторге от возможности встречаться с человеком, который, во всяком случае в Англии, стал главой теории относительности. Эйнштейн был не в счет просто потому, что он был далеко.

Второе направление моей математической деятельности определил Бейкер, занимавший тогда в Кембридже должность профессора геометрии. Я не слышал ни одной его лекции. Вместо этого я посещал лекции Каннингхэма и Фаулера. Мне не очень нужна была геометрия, и поэтому я не ходил на лекции Бейкера. Однако по субботам Бейкер обычно устраивал чаепития, и я тоже оказался в числе приглашенных. После чая кто-то из присутствующих всегда делал доклад, посвященный одной из задач геометрии. В этих докладах всегда фигурировала геометрия плоского пространства и все задачи решались методами проективной геометрии. Прослушав доклад, все убеждались в том, что проективная геометрия — это та единственная геометрия, которой лишь и стоит заниматься. Она обладала значительно более мощным аппаратом, чем геометрия, ограниченная аксиомами Евклида. Обсуждение очень часто выходило за рамки трех измерений и проводилось в четырех-, пяти- или шестимерном пространстве. Изучались разные фигуры, которые можно построить в пространствах более высокой размерности. Я был поражен огромными возможностями методов проективной геометрии. Нередко, изучая фигуры в многомерных пространствах, можно было получить короткие доказательства для обычного трехмерного евклидова пространства. Получить их же обычным способом было бы очень нелегко.

Эти чаепития сыграли огромную роль в формировании моего интереса к математической красоте. Оказалось, что самое важное — стремиться записать уравнения в красивом виде, и тогда успех обеспечен. Я начал заниматься проективной геометрией и сделал доклад на одном из чаепитий. Это была моя первая в жизни лекция и, конечно, я ее прекрасно запомнил. В ней шла речь о новом методе решения задач проективной геометрии. Такими были события, на фоне которых я начал работать. Я оказался по существу в мировом центре

развивающейся теории атома. Надо сказать, что Бор всю свою жизнь был по-дружески расположен к Резерфорду. Он часто приезжал в Кембридж и читал нам лекции. Кроме того, Фаулер часто посещал Копенгаген и, зная все о последних событиях, держал меня, конечно, в курсе дела. В 1925 г. Фаулер пробыл в Копенгагене три месяца, т. е. всю зиму.

Мне также посчастливилось присутствовать в Кавендишской лаборатории. Я слушал там, как рассказывали экспериментаторы о своей работе. Я слушал Резерфорда, Астона, Вильсона и многих других. Экспериментаторы научили меня понимать их проблемы.

Мне хотелось бы рассказать о том, как Бор читал лекции в Кембриджском университете. Глубина его мышления произвела на всех огромное впечатление. Каждую лекцию он начинал всегда с самого начала, т. е. с того, как он пришел к объяснению формулы Бальмера, и на ее основе строил все дальнейшие рассуждения. Говорил Бор медленно и ему, конечно, требовалось много времени, чтобы добраться до более современного подхода, который был целью его лекции. В результате каждая лекция длилась обычно до двух часов или даже больше, но Бора всегда очень внимательно слушали. Его слова зачаровывали аудиторию.

Внимательно слушать было просто необходимо, потому что Бор говорил очень тихо. В то время еще не пользовались микрофонами и приходилось напрягать слух, чтобы, понять, о чем идет речь.

Я был под очень большим впечатлением от того, что говорил Бор. Тем не менее, поскольку все его аргументы носили в основном качественный характер, я не мог разглядеть за ними реальные факты. Я ожидал услышать утверждения, которые можно было бы записать в виде уравнений, но Бор высказывал такие утверждения чрезвычайно редко. Пожалуй, я не могу оценить, насколько лекции Бора повлияли на мою последующую работу. Это вопрос, ответа на который я не знаю. Непосредственного влияния, конечно, не было, потому что Бор не стимулировал поиски новых уравнений.

В то время я был простым аспирантом, и кроме научной работы у меня не было никаких других обязанностей. Поэтому со всей энергией я взялся за задачи, которые тогда стояли перед физиками. Как и большинство современных студентов, я совершенно не интересовался, политикой. Я целиком отдался научной работе и день за днем упорно занимался, отдыхая лишь по воскресеньям, а в воскресенье, если была хорошая погода, я уезжал за город и подолгу гулял там один. Мне хотелось отдохнуть от интенсивных занятий в течение всей прошедшей недели, а, если получится, еще и придумать новый подход к задаче, которой я собирался заниматься в понедельник. Однако целью моих прогулок был все-таки отдых и поэтому задачи витали где-то в моем сознании, не выплывая на поверхность.

Вот так я жил. Время от времени происходило что-нибудь интересное. Однажды всех очень взволновало сообщение о теории Бора — Крамерса — Слейтера⁷. Эта теория представляла собой новый, с моей точки зрения, очень разумный подход. Поскольку за ним стоял Бор, мне казалось что новая теория стоит того, чтобы ею заниматься. Правда, она означала отказ от сохранения энергии в индивидуальных процессах, но меня это не особенно беспокоило. Справедливость закона сохранения энергии подтверждалась в то время только статистически. Таким образом, возникал способ избежать некоторых фундаментальных трудностей, связанных с излучением. Излучение испускалось непрерывными волнами, а поглощалось мгновенно квантами. Такая картина, никому раньше не приходившая в голову, согласовывалась со всеми известными в то время экспериментальными фактами. Но теория Бора — Крамерса — Слейтера принесла нам удовлетворение ненадолго, потому что через год в точном эксперименте по рассеянию рентгеновских лучей электронами Гейгер и Боте показали⁸, что энергия детально сохраняется в каждом отдельном событии. Таким образом, интерес к новой теории оказался преходящим и бесследно исчез.

Замечу, что идею Бора — Крамерса — Слейтера в 1936 г. возродил Шэнкленд⁹. Он поставил опыт, похожий на опыт Гейтгера — Боте, но только вместо рентгеновского излучения использовал γ -лучи, и объявил, что в этом случае не было детального сохранения энергии.

Я тогда очень уважал экспериментаторов, и когда они делали какое-нибудь уверенное утверждение, я им верил и потому легко принял точку зрения Шэнкленда. Я размышлял о том, почему закон сохранения энергии нарушается в случае высоких энергий, несмотря на то, что для низких энергий он справедлив. Меня все это так заинтересовало, что я даже послал маленькую заметку в журнал «Nature»¹⁰.

Однако через год Шэнкленд повторил эксперимент. Оказалось, что предыдущие результаты были неточными и детальное сохранение энергии подтвердилось. Так мы опять вернулись к точной квантовой теории, с точным законом сохранения энергии.

Автором другой идеи того времени был де Бройль. Он выдвинул теорию¹¹, в которой устанавливалась связь между частицами и волнами. Это была очень стройная теория и она сразу привлекла меня своей красотой. Частицы и волны были связаны релятивистским образом, причем так, что при стремлении масс покоя частиц к нулю, получалось соотношение между квантами света и электромагнитными волнами.

Восхищенный красотой работы де Бройля, я, тем не менее, не мог воспринимать волны всерьез. Я всецело пребывал во власти теории Бора и предложенные им орбиты понимал совершенно буквально — электроны были реально существующими частицами, а волны де Бройля представлялись мне просто математической выдумкой, совершенно не существенной для физиков.

Моя точка зрения была, конечно, совершенно неправильной. Работу де Бройля прочитал Шредингер. У Шредингера был иной подход и он получил другое образование. Он хорошо изучил собственные функции и собственные векторы, о которых я не знал совсем ничего. Поэтому Шредингер со своим взглядом на мир сумел развить идеи де Бройля и получить блестящий результат. Примитивные формулы де Бройля, которые годились только для описания свободных частиц, Шредингер распространил на частицы, движущиеся в электромагнитном поле, что привело его к волновой механике.

Итак, я рассказал вам один из тех случаев, когда я сильно ошибался.

Вам, наверно, интересно узнать, какими физическими задачами занимался я сам. Я очень много работал над тем, чтобы разобраться в гамильтоновой динамике, и прочел книгу Зоммерфельда «Строение атома и спектры»¹². Я тогда не очень хорошо знал немецкий, но на мое счастье эта книга была переведена на английский. Она дала мне основы тех знаний, которые были необходимы, чтобы заниматься теорией атома. В книге Зоммерфельда имелось приложение, посвященное гамильтоновой динамике и ее применению в квантовой теории. Я очень тщательно изучил по этому приложению теорию Гамильтона и прочитал другие книжки на ту же тему. Я проштудировал теорию преобразований, связанную с гамильтоновой динамикой, и освоился, во всяком случае, познакомился с заложенными в ней общими идеями.

Студенты в Кембридже часто собирались, чтобы обсудить научные проблемы. Среди таких собраний был клуб, организованный Капицей, молодым физиком, приехавшим из России. Капица был очень талантлив, и Резерфорд, высоко оценив его способности, помог ему обосноваться в Кембридже. Сам Капица обладал чрезвычайно динамичным характером. Он создал клуб физиков, в который входили как теоретики, так и экспериментаторы. Мы собирались каждый вторник по вечерам после обеда, и один из нас читал доклад о последних достижениях в физике.

По правде говоря, такое время меня не особенно устраивало, так как после обеда я был совсем сонным. Работал я обычно по утрам. Я думаю, что утро — это время, когда работоспособность мозга достигает максимума;

к концу же дня я становлюсь довольно тупым, особенно после обеда, поэтому я находился не в лучшем состоянии духа для восприятия новой информации. Все же посещение собраний Клуба Капицы себя оправдало.

Летом 1925 г. Гейзенберг приехал в Кембридж и выступил с докладом в Клубе Капицы. Основной темой его доклада были «Аномалии в эффекте Зеемана», и я почти все понимал. Однако в конце, когда Гейзенберг рассказывал о своих новых идеях, я уже слишком устал, чтобы следить за докладом, и перестал его воспринимать. Гейзенберг же говорил о возникновении своих идей о новой механике. Но я совершенно не осознавал, что Гейзенберг в этот момент вводит нечто совершенно революционное, а потом и вовсе забыл все, что он говорил по поводу новой теории. Более того, я был почти уверен, что о ней вообще не шла речь, но люди, присутствовавшие на том заседании Клуба Капицы, уверяли меня, что я ошибаюсь. В частности, Фаулер был в этом убежден, и мне остается лишь поверить в то, что Гейзенберг действительно рассказывал о своих идеях, а я просто никак на них не отреагировал и, таким образом, упустил счастливую возможность начать заниматься новой механикой.

К ее изучению я приступил немного позже. В конце августа я вернулся в Бристоль, чтобы провести часть каникул с родителями. В это же время Гейзенберг прислал Фаулеру корректуру своей первой статьи¹³, посвященной новой механике, а Фаулер передал ее мне с пометкой: «Что вы об этом думаете?»

Корректура пришла ко мне то ли в конце августа, то ли в начале сентября (я не совсем уверен в дате), и я ее, конечно, прочел. Сначала она не произвела на меня особого впечатления, потому что показалась слишком сложной. Я не понял основной мысли, а вывод квантовых условий показался мне очень искусственным и я просто пропустил его, как не представляющий интереса. Однако через неделю или дней через десять я вернулся к статье Гейзенberга, изучил ее более внимательно и неожиданно понял, что она дает ключ к решению всех трудностей, с которыми мы тогда сталкивались.

Моя предыдущая работа была целиком связана с исследованием индивидуальных состояний. Если вам интересны те ложные пути, на которые я попадал в своей работе, то один из них — это то, что я изучил гамильтонову теорию возмущений планетных орбит и раздумывал, как ее применить к взаимодействию электронов в атоме Бора. Идя по этому пути, я овладел методами гамильтоновой механики, но, конечно, ни к чему не пришел.

Гейзенберг высказал совершенно новую мысль, что всегда надо рассматривать не одно, а два стационарных состояния.

На этом я, пожалуй, остановлюсь, а потом продолжу свой рассказ.

II

Вчера я говорил о том, с каким образованием и в какой обстановке я начал заниматься задачами новой механики. Изучая проективную геометрию, я научился понимать красоту математических формул. Меня также очень интересовала теория относительности, в то время совсем новая наука, которая только что возникла и была предметом всеобщего любопытства. Кроме того, существовала квантовая механика, исполненная своих проблем, над которыми я немало размышлял, правда, без особенного прогресса. Я был так погружен в боровские орбиты, что, не будь Гейзенберга, мне бы не удалось добиться никаких успехов в изучении атомной теории. Требовался совершенно другой уровень мышления, чтобы порвать с идеей построения теории на основе лишь одних боровских орбит.

Первые два года в Кембридже, когда гейзенберговской теории еще не было, я много занимался теорией относительности. Вчера я не подчеркнул этого достаточно ясно. Теория выглядела как задача, доступная всем: обнаружив нерелятивистскую формулу, имеющую какой-нибудь физический смысл,

надо переписать ее так, чтобы она согласовывалось со специальной теорией относительности. Это было очень похоже на игру, и я втягивался в нее при первой же возможности. Время от времени получался интересный для меня результат и я писал по этому поводу небольшую статью.

Так было до сентября 1925 г., когда мне представился случай прочитать первую работу Гейзенберга. Как вы уже вчера слышали, вначале моя реакция была неблагоприятной. Прошло около десяти дней, прежде чем я сумел разобраться в этой работе и понять, что в ней содержится ключ к разгадке строения атома.

Как вы думаете, что я тогда сделал? Вы, наверное, догадались, что меня не удовлетворял нерелятивистский вид формул Гейзенберга, и я задался вопросом, можно ли с помощью прежних рассуждений переписать их так, чтобы они укладывались в схему специальной теории относительности.

Главной отличительной чертой работы Гейзенberга, которая находилась в дисгармонии с теорией относительности, было то, что он строил теорию из матричных элементов, как из кирпичей, каждый матричный элемент связывался с двумя значениями энергии, в соответствии с двумя состояниями — двумя энергетическими уровнями.

Отсюда вытекало естественное предположение, что если каждый из этих матричных элементов связан с двумя значениями энергии, то ему должны соответствовать и два значения импульса. Но если каждому матричному элементу вообще соответствуют два значения энергии и два значения импульса, то мы приходим к картине, в которой эти величины невозможно разумным образом связать между собой. Вся структура получилась бы слишком рыхлой. Тогда мне пришло в голову, что на значения импульса следует наложить некоторые ограничения. Естественное ограничение состояло в том, чтобы разность двух значений импульса равнялась бы разности двух соответствующих значений энергии, поделенной на скорость света c , и чтобы эта разность импульсов имела одинаковое направление для всех матричных элементов.

Это означало бы, что все рассматриваемые матричные элементы связаны со светом, распространяющимся в одном определенном направлении. Такой несколько искусственный случай с релятивистской точки зрения представляется все же менее искусственным, чем то, что получится, если всем матричным элементам поставить в соответствие разные энергии в одной определенной лоренцевой системе координат, а соответствующее изменение импульса будет равно нулю.

Итак, у меня возникла идея, с помощью которой можно было приступить к работе. Я принял за дело, но существенно продвинуться мне не удалось. Вскоре я понял, что задача не имеет большого значения, и бросил эту работу.

Однако примерно через год я опять к ней вернулся, когда писал статью о приложении релятивистской квантовой механики к комптоновскому рассеянию¹⁴. В этой статье содержалась суть моих ранних идей о том, что каждый матричный элемент соответствует двум уровням энергии и двум значениям импульса, а разность импульсов равна разности энергий, поделенной на скорость света.

Теорией Гейзенберга я начал заниматься в Бристоле, вернувшись домой на остаток летних каникул. Приехав в начале октября 1925 года назад в Кембридж, я начал вести свой прежний образ жизни: интенсивные занятия в течение недели и уединенные прогулки за городом по воскресеньям. Отдых был главной целью моих прогулок; в понедельник надо было приступать к работе со свежими силами.

Меня очень беспокоила некоммутативность динамических переменных. В построенной Гейзенбергом теории динамические переменные соответствовали матрицам, причем так, что при перемножении двух переменных u и v получалось uv , если умножать u на v , или vu , если умножать v на u . Появлялась разность $uv - vu$, что было трудно понять.

Я узнал потом, что сам Гейзенберг чрезвычайно встревожился, когда заметил, что uv отличается от vu . Он должен был обнаружить это неравенство довольно быстро и, конечно, очень расстроился, потому что подобный результат был как-то чужд физикам. Все физики воспитывались на решении физических задач с помощью законов Ньютона и их следствий и привыкли считать, что произведение динамических переменных обладает свойством коммутативности. Обнаружив некоммутативность, Гейзенберг решил, что это неизбежный конец теории и от нее надо отказаться. Мне кажется, что Гейзенбергу нужна была просто небольшая поддержка его учителя, профессора Борна. Тогда Гейзенберг сумел бы справиться с мучительными переживаниями, причиной которых был на самом-то деле революционный характер выдвинутых им новых идей.

У меня, конечно, не было того страха перед провалом теории, который с самого же начала овладел Гейзенбергом. Поэтому я подошел к задаче смелее и вскоре понял, что главное в ней — некоммутативность. Именно некоммутативность, приведшая Гейзенberга в отчаяние, оказалась важнейшим свойством созданной им теории, тем свойством, которое нужно было понять. Я хорошо знал гамильтоновы уравнения, которые могли служить основой для понимания некоммутативности теории Гейзенberга.

В одно из октябрьских воскресений 1925 г., когда, несмотря на твердое желание отдохнуть на прогулке, я усиленно размышлял над разностью $uv - vu$, мне пришла в голову мысль о скобках Пуассона. Я вспомнил, что в продвинутых курсах динамики я кое-что читал о таких странных величинах, как скобки Пуассона, и мне показалось, что существует тесная аналогия между скобками Пуассона для двух величин u и v и коммутатором $uv - vu$.

Лишь только меня осенила эта идея, я сразу пришел в возбуждение, которое вскоре, естественно, сменилось реакцией: «Не может быть, это ошибка».

Я плохо помнил, что такое скобки Пуассона, и не знал для них точной формулы. В моей голове были лишь смутные воспоминания. Но скобки Пуассона таили в себе замечательные возможности и я подумал, что, может быть, мне удастся сделать великое открытие. Я был очень обеспокоен сложившейся ситуацией и чувствовал себя обязанным освежить свои сведения о скобках Пуассона, найдя хотя бы их определение.

За городом это было невозможно, поэтому мне оставалось поспешить домой и поискать что-нибудь о скобках Пуассона. Я просмотрел свои записи, те записи, которые я делал на разных лекциях, но там не нашлось ни одного упоминания о скобках Пуассона. Имевшиеся у меня учебники были слишком элементарны, чтобы содержать в себе такие сведения. Большая просто ничего не мог сделать, потому что в воскресенье вечером библиотеки не работали. В мучительном ожидании я провел ночь, ничего не зная о том, стоила ли чего-нибудь моя идея, но в течение этой ночи уверенность моя крепла. Наутро я бросился в библиотеку прямо к открытию и, найдя в «Аналитической динамике» Уиттекера¹⁵ скобки Пуассона, обнаружил, что это как раз то, что мне нужно. Они были абсолютно аналогичны коммутатору. Точная формула для скобок Пуассона имеет следующий вид:

$$[u, v] = \sum_r \left(\frac{\partial u}{\partial q_r} \frac{\partial v}{\partial p_r} - \frac{\partial u}{\partial p_r} \frac{\partial v}{\partial q_r} \right). \quad (2)$$

Величины q и p образуют набор гамильтоновых переменных для описания динамической системы, а сумма берется по всем степеням свободы. Вы видите, что это довольно сложная формула, и простительно, что я не мог ее точно вспомнить во время прогулки, ибо не было никаких причин считать ее хоть сколько-нибудь существенной. Я встречал эту формулу в книгах, когда речь шла о динамической теории преобразований, но мне никогда не приходило в голову заучивать наизусть такие подробности.

На самом деле все сильно запутывалось из-за того, что в теории существовали еще одни скобки — скобки Лагранжа. В общем виде скобки

Лагранжа очень похожи на скобки Пуассона, но имеют, конечно, совершенно другой смысл. Ситуация сложилась так, что люди, занимающиеся квантовой теорией, придают большое значение скобкам Пуассона, а скобки Лагранжа вообще не считают существенными.

Мысль о том, чтобы связать скобки Пуассона с коммутаторами, положила начало моей работе в области новой квантовой механики. При изучении свойств этих двух объектов оказывается, что, несмотря на видимое различие, они очень тесно связаны между собой, причем так тесно, что достаточно лишь подставить подходящий численный множитель $i\hbar/2\pi$, и величина $uv - vu$ в квантовой механике станет аналогом величины

$$\frac{i\hbar}{2\pi} \sum_r \left(\frac{\partial u}{\partial q_r} \frac{\partial v}{\partial p_r} - \frac{\partial u}{\partial p_r} \frac{\partial v}{\partial q_r} \right) \quad (3)$$

в классической механике.

Сделанный нами шаг очень важен, потому что он дает нам понять, чем заменяются частные производные классической механики при переходе к динамическим переменным в квантовой теории. В классической механике фигурируют динамические переменные, которые можно складывать и перемножать. То же самое можно делать и с квантовыми переменными. В классической механике мы дифференцируем по времени. Эту же операцию можно было бы прямо перенести в квантовую теорию, если считать, что квантовые переменные u и v являются функциями временного параметра t . Однако не видно, как операцию частного дифференцирования можно непосредственно перенести в квантовую теорию, не используя указанную аналогию. Таким образом, если в классической механике требуется взять частную производную по какой-нибудь переменной, то в квантовой механике этот процесс соответствует вычислению коммутатора рассматриваемой величины с некоторой другой переменной.

Приведенный результат, суть которого состояла в том, что дифференцирование переменных оказалось пригодным и в квантовой механике, представлялся мне главным выводом моей работы. Тогда я поставил ту же задачу в общем виде: найти такой способ дифференцирования, который годился бы и для квантовых переменных.

Забудем сейчас формулу, связывающую между собой коммутатор и скобки Пуассона, и попытаемся найти процедуру дифференцирования, подходящую для квантовых переменных.

Пусть мы имеем квантовую переменную x . Пусть v — какая-нибудь другая квантовая переменная. По Гейзенбергу, обе эти переменные могут быть записаны в виде матриц. Что нужно сделать для того, чтобы выражение dx/dv имело смысл?

Прежде всего, надо потребовать, чтобы величина dx/dv была линейной функцией x . Для этого матричные элементы dx/dv должны быть линейными функциями матричных элементов x . Следовательно,

$$\frac{dx}{dv} \cdot (nm) = \sum_{n', m'} a(nm; n'm') x(n'm'), \quad (4)$$

где a представляют собой неизвестные коэффициенты, которые не должны зависеть от x .

Теперь наложим требование, чтобы произведение xu дифференцировалось по закону

$$\frac{dxy}{dv} = \frac{dx}{dv} y + x \frac{dy}{dv}, \quad (5)$$

где через y обозначена другая квантовая переменная, представленная в виде матрицы.

Мы видим, что для выполнения этого требования необходимо, чтобы производная $\frac{dx}{dv}$ имела вид

$$\frac{dx}{dv} = xa - ax. \quad (6)$$

Здесь a — еще одна квантовая переменная, записанная в матричном виде. Я принялся изучать уравнение (6), чтобы выяснить, чему оно соответствует в случае больших квантовых чисел. Так я пришел к формуле, связывающей между собой коммутатор и скобки Пуассона.

Все эти рассуждения я взял за основу своей первой статьи по квантовой механике. В большей части статей я обычно представлял свои мысли в той последовательности, в которой они приходили мне в голову, но в данном случае я сделал исключение. Мне не хотелось, чтобы главной предпосылкой работы стало случайно явившееся мне соотношение между коммутатором и скобками Пуассона (я не смог бы даже объяснить, как эта мысль пришла мне в голову). Я предпочел строить свою теорию так, чтобы все действия оказались логически обоснованными. Задача выглядела так. В квантовую теорию требовалось ввести процедуру дифференцирования, причем так, чтобы для нее выполнялось требование линейности и был справедлив закон умножения (5). Исходя из этого, выводится формула (6) и находится ее связь со скобками Пуассона.

Когда статья была написана, Фаулер представил ее в Королевское общество. Там мою работу сочли важной, и она была опубликована¹⁶ очень быстро, гораздо быстрее обычного.

Я послал копию Гейзенбергу и мгновенно получил ответ. Мне бы хотелось рассказать об этом и о некоторых других письмах Гейзенberга, потому что в них есть информация, которую нельзя получить из опубликованных работ. Гейзенберг писал мне по-немецки. Моих знаний немецкого языка вполне хватало, чтобы понимать эти письма. Примерный перевод письма Гейзенберга выглядит так *):

«Я с огромным интересом прочел Вашу прекрасную работу. Все Ваши результаты, несомненно, правильны, если, конечно, верить в новую теорию». Эта фраза представляется мне очень существенной, потому что из нее видно, что на самом деле Гейзенберг был не очень уверен в своей теории и, по крайней мере, считал, что в ней пока можно сомневаться — вспомните фразу «если, конечно, верить в новую теорию».

«Использованное Вами представление для условия, которому удовлетворяют частота и энергия, проще и красивее, чем доказательство справедливости уравнения $v = \partial H / \partial J$ в классической теории», — речь идет о связи между частотой и энергией в классической гамильтоновой теории.

Гейзенберг продолжает: «Надеюсь, Вас не огорчит тот факт, что часть Ваших результатов уже была получена некоторое время назад в нашем институте. Сейчас они публикуются независимо в двух статьях: одна написана Борном и Иорданом¹⁷, а вторая Борном, Иорданом и мной¹⁸. В своих результатах Вы продвинулись значительно дальше, это особенно касается общего определения дифференцирования и связи квантовых условий со скобками Пуассона. Мне бы хотелось обсудить один не очень существенный момент». Здесь Гейзенберг переходит к квантовому условию, о котором шла речь в моей статье. Для системы с одной степенью свободы единственное квантовое условие имеет вид

$$2\pi m (\dot{q}\dot{\bar{q}} - \dot{\bar{q}}\dot{q}) = ih. \quad (7)$$

Приравнивая ih , постоянный член в левой части уравнения (7), мы получаем квантовое условие Гейзенberга. Но я писал в своей статье, что если при-

*) Письме Гейзенберга Дираку, 20 ноября 1925 г., 2 с., по-немецки.

равнять нулю оставшиеся члены в левой части уравнения, то получаются новые условия, которых нет в теории Гейзенберга.

Гейзенберг возражал против этого утверждения. Он считал, что новые условия имеют вид

$$\frac{d}{dt}(pq - qp) = 0. \quad (8)$$

В некоторых специальных случаях соотношение (8) следует из уравнений движения. Имеются в виду те случаи, когда H представимо в виде суммы двух членов, один из которых зависит только от q , а второй — только от p . Гейзенберг приводит подробные вычисления и замечает, что по его мнению этот результат можно доказать и для общего случая, если H вещественно.

Он повторяет, что считает все сказанное несущественным. Далее он пишет: «В нашей статье мы сделали попытку дать достаточно полное представление обо всей теории, включая теорию возмущений, вырожденные случаи и т. д.». Затем можно вывести дисперсионную формулу Крамерса — Гейзенберга. Однако вместо этого Гейзенберг пишет: «Затем можно вывести дисперсионную формулу Крамерса», — несмотря на то, что все называют ее дисперсионной формулой Крамерса — Гейзенберга.

В конце Гейзенберг сообщает, что «Паули удалось построить квантовомеханическую теорию атома водорода и получить бальмеровскую формулу. Я с удовольствием пошлю Вам корректуру этой статьи и буду рад услышать о том, что Вы продвинулись вперед». Письмо Гейзенберга было очень дружеским. Думаю, что он меня совершенно не знал. Я видел его в Кембридже, когда он выступал на заседании Клуба Капицы, но я был всего лишь одним из слушателей. Не думаю, чтобы меня ему представляли. Лектор обычно не обращает внимания на какого-то одного слушателя, если на то нет специальной причины, а в то время не было оснований специально выделять меня для представления Гейзенбергу.

Его письмо было очень доброжелательным: он не хотел, чтобы я огорчался из-за того, что другие люди, которые одновременно со мной работали над теми же задачами, в какой-то степени предвосхитили мои результаты. Его письмо было переполнено похвалами моих работ.

Всего через три дня я получил от Гейзенберга второе письмо *). Оно, безусловно, было отправлено до того, как пришел мой ответ на первое. Во втором письме Гейзенберг пишет: «Отослав Вам ответ, я долго обсуждал Вашу работу с Иорданом, и у нас возникли некоторые вопросы, которые мне бы хотелось выяснить. Я считаю, что самый важный Ваш результат заключается в общей формуле дифференцирования (формула (6)). Нисколько не сомневаясь в ее справедливости, мы не совсем поняли представленное Вами доказательство. Вы выводили это уравнение из условия линейности». Гейзенберг имеет в виду уравнение (4). Далее он пишет: «На первый взгляд кажется, что те же самые рассуждения можно применить к обычным функциям. Тогда мы получили бы

$$\frac{dx}{dv} = ax, \quad x = e^{av}, \quad (9)$$

что вообще неверно. Это вовсе не возражение, но Вам бы следовало привести более подробный вывод. У меня есть еще одно пожелание. Мне кажется, что физический смысл теории недостаточно характеризуется словами о том, что математические операции, которые используются при выводе физических результатов, отличаются от классических. Я считаю, что на самом деле мы скорее имеем дело с изменением кинематики. А тогда вопрос о справедливости классической механики просто не встает. Несмотря на это, на основе новой кинематики можно построить такую механику, которая будет практи-

*) Гейзенберг — Дираку, 23 ноября 1925 г., 2 с., по-немецки.

чески аналогична классической и в которой доказываются закон сохранения энергии и условие, которому удовлетворяют частоты. Может быть, это различие Вам кажется несущественным, но я считаю, что в нем заключен важный физический смысл».

Не могу точно вспомнить, что я тогда написал Гейзенбергу в ответ на его письма. Ведь все это происходило 50 лет назад. Наверное я написал что-нибудь вроде того, что я в своей статье использовал совершенно иные доводы, чем те, которые привели его к соотношению $x = e^{\alpha}$. На второе замечание я, вероятно, ответил, что в самом деле считал его аргументы довольно несущественными, потому что они никак не повлияли на вид уравнений.

Эти и последующие мои письма Гейзенберг хранил до 1945 г., т. е. до конца войны. Тогда он собрал все важные бумаги, и сдал их американским военным властям. Получить их обратно Гейзенбергу не удалось. Может быть, сейчас они и лежат среди секретных папок Американской комиссии по атомной энергии, но на сегодняшний день мы должны считать их пропавшими. Может, их кто-нибудь в будущем раскопает, и историки науки смогут их получить. Но пока мы должны делать все возможное, не имея этих писем. Я могу теперь лишь фантазировать по поводу своих ответов. Поскольку мои нынешние знания значительно шире, эти придуманные ответы могут, конечно, сильно отличаться от тех, какие я писал на самом деле.

1 декабря 1925 г. Гейзенберг отправил мне третье письмо, в котором были следующие слова *): «Огромное Вам спасибо за интересное письмо. К сожалению, в последний раз я неясно сформулировал некоторые вопросы и хотел бы задать их еще раз. Мои возражения против вывода формулы (4) выглядят следующим образом. Если эта формула вытекает из условия линейности

$$\frac{d}{dv}(x+y) = \frac{dx}{dv} + \frac{dy}{dv} \quad (10)$$

то она должна быть справедлива и в том случае, если существует всего лишь одно стационарное состояние. Ведь фактически, нигде нет предположения о том, что число стационарных состояний должно быть бесконечным. Следовательно, для одного стационарного состояния, когда каждое из чисел n , m , n' и m' равно единице, получаются уравнения

$$\frac{dx(11)}{dv} = a(11, 11)x(11), \quad \frac{dy(11)}{dv} = a(11, 11)y(11). \quad (4')$$

Положим $x(11) = v^n$, $y(11) = v^m$. Ваши соотношения (10) (см. выше) и (5), конечно же, выполняются, а вот (4') в первом случае дает $a(11, 11) = 1/nv$, а во втором случае — $a(11, 11) = 1/mv$, что, похоже, ведет к противоречию. Прошу Вас, воспримите все сказанное не как критику, а просто как свидетельство того, что Ваши уравнения трудно понять без дополнительных разъяснений.

При обсуждении Вашей работы я немало размышлял еще над одним пунктом. Вы, в частности, пишете, что зависимость энергии от переменных действия будет иметь такой же вид, как в классической теории. Трудно поверить, что этот результат справедлив в общем случае». Затем Гейзенберг в качестве контрпримера приводит ангармонический осциллятор.

Думаю, что мой ответ на это последнее письмо выглядел примерно так: «В случае, когда существует только одно стационарное состояние, переменные коммутируют, поэтому процесс дифференцирования теряет смысл, и попытка проследить все рассуждения для случая одного стационарного состояния ведет к противоречию».

Второе замечание Гейзенberга было совершенно правильным. Я проявил небрежность, заявив, что энергия одинаковым образом зависит от J и в классической, и в квантовой теории, а Гейзенберг справедливо указал мне на

*) Гейзенберг — Дираку, 1 декабря 1925 г., 3 с., по-немецки.

этую ошибку. Он сказал, что если бы мое утверждение оказалось верным, то это никого бы не порадовало, потому что тогда пропала бы всякая надежда понять сложные атомные спектры, которые совсем не могут быть вычислены в классической теории.

Свое письмо Гейзенберг заканчивает словами: «Не считите, пожалуйста, мои замечания критикой в адрес Вашей замечательной работы. Дело в том, что я должен написать для журнала «Mathematische Annalen» статью о современном состоянии теории, и не перестаю восхищаться тем, как с помощью простой математики Вы легко справились с этой задачей».

Вслед за письмом я получил открытку, датированную тем же днем — Гейзенберг писал *): «В последнем своем письме, отправленном сегодня днем, я забыл упомянуть об одной серьезной трудности, которая возникла в связи с Вашим уравнением (11)». Речь идет об уравнении

$$xy - yx = \frac{i\hbar}{2\pi} [x, y]. \quad (11)$$

«Рассмотрим случай, когда имеется одна степень свободы, и положим x равным p^2 , а y равным q^2 . Тогда получим

$$xy - yx = p^2 q^2 - q^2 p^2 = \frac{i\hbar}{2\pi} [p^2, q^2] = -\frac{i\hbar}{2\pi} \cdot 4qp. \quad (12)$$

Однако простое вычисление дает

$$p^2 q^2 - q^2 p^2 = p(pq^2) - (pq^2)p + p(q^2p) - (q^2p)p = -\frac{\hbar}{2\pi i}(2pq + 2qp). \quad (13)$$

Серьезная трудность, о которой говорит Гейзенберг, просто связана с тем, что скобки Пуассона, вычисленные в квантовой теории и в классической, равны между собой лишь в некоторых простых случаях. В более же сложных случаях следует сразу пользоваться результатом вычисления коммутатора, не прибегая к классической формуле. В сущности, это я и написал Гейзенбергу по поводу замеченной им трудности.

Так началась для меня квантовая механика. Надо сказать, что, работая над статьей, я всегда очень тщательно обдумывал систему обозначений. Я считаю, что в статьях на новую тему вопросу обозначений следует уделять большое внимание, потому что такая статья может стать началом нового направления, которому суждено будет жить в веках, а увековеченные плохие обозначения реально помешают дальнейшему развитию.

С проблемой обозначений я столкнулся в связи со скобками Пуассона. Всю информацию о них я почерпнул из книги Уиттекера. «Аналитическая динамика»¹⁵, где для скобок Пуассона использовались круглые скобки, а квадратными скобками обозначались скобки Лагранжа. В квантовой теории скобки Лагранжа вообще не нужны, в ней нужны только скобки Пуассона. Поэтому обозначения Уиттекера казались мне неудобными. Они наводят на мысль о скалярном произведении, которое мы знаем из векторного анализа. Однако скалярное произведение симметрично относительно перестановки двух входящих в него членов, а скобки Пуассона антисимметричны относительно их перестановки. Поэтому я смело воспользовался другим обозначением скобок, отличным от обозначений Уиттекера. С тех пор так поступают все. Оказалось, что величину, антисимметричную относительно перестановки входящих в нее двух членов, очень удобно обозначать квадратными скобками.

По поводу обозначений возник и другой вопрос. Нередко в частном случае выполняется равенство $uv - vu$. Специалисты по некоммутативной алгебре говорили тогда, что u перестановочно с v . Слово «перестановочно» казалось мне не совсем подходящим. Говоря о перестановках, обычно подразумевают, что меняется порядок расположения нескольких величин, а здесь

*) Гейзенберг — Дираку, 1 декабря 1925 г., по-немецки.

было всего две величины. Поэтому я ввел слово «коммутировать». Не думаю, чтобы математики пользовались им до меня. Я заявил, что если $uv = vu$, то это означает, что u и v коммутируют друг с другом. С тех пор этот термин тоже вошел в употребление.

Ситуация сложилась так, что мне пришлось иметь дело с новыми, квантовыми переменными, которые представлялись мне совершенно загадочными, и поэтому я придумал для них новое слово. Я назвал их q-числами, чтобы они отличались от обычных переменных, которые фигурировали в математике и которые я называл с-числами. Буква q — это первая буква слова «квантовый» (quantum) или, может быть, слова странный (queer), а с может обозначать «классический» (classical) или коммутирующий (commuting). Затем я приступил к построению теории q-чисел. с-числа можно рассматривать просто как частный случай q-чисел, которые обладают тем свойством, что коммутируют с чем угодно.

Я ничего не знал о происхождении q-чисел и считал, что гейзенберговские матрицы как раз и служат примером чисел, но могло оказаться, что q-числа имеют и более общий смысл. Все, что было известно о q-числах, сводилось к тому, что они подчиняются алгебре, в которой справедливы все-общие аксиомы, кроме закона коммутативности умножения.

Я продолжал развивать теорию, в которой был волен делать любые нужные мне допущения, лишь бы только они не приводили сразу к противоречию. Я не собирался заниматься ни выяснением математической природы q-чисел, ни точностью вычислений с ними.

Вы, наверное, уже заметили, как повлияло на меня инженерное образование. Я стремился поскорее получить результаты, в правильности которых я был в какой-то степени уверен, пускай даже они и не следовали из строгих логических рассуждений. Поэтому я пользовался математикой для инженеров, а не той строгой математикой, которой меня учил Фрейзер.

Быть может, такой подход лучше других обеспечивал быстрое развитие теории, но он-то и привел меня к ошибкам. Одной из них было предположение, что каждое q-число имеет обратное. Вторую ошибку я сделал, предположив, что если произведение двух сомножителей A и B равно нулю, то один из сомножителей должен равняться нулю.

Я получил письмо от Бриллюэна, в котором он указал мне на эти ошибки. Письмо было датировано марта 1926 г. Бриллюэн писал, что мои предположения относительно q-чисел несправедливы для матриц. Прошло немало времени, прежде чем я привык к мысли, что придуманные мной q-числа вовсе не являются более общими, чем матрицы, и для них должны выполняться те же ограничения, которые в математике доказываются для матриц.

Я сделал и еще одно предположение. Оно заключалось в том, что для любой пары q-чисел u и v всегда можно найти такое q-число b , что $v = buh^{-1}$. Исходя из этого, я сумел построить общую теорию функций от q-чисел, очень удачную с точки зрения математики. Однако мое предположение было, разумеется, неверным. Сейчас мы знаем, что оно может выполняться лишь в одном частном случае, когда u и v имеют одни и те же собственные значения.

Все эти математические тонкости меня в то время не интересовали, и я продолжал заниматься своими уравнениями. Вскоре я написал вторую статью, в которой показал, как, работая с q-числами по правилам их алгебры, построить теорию спектра водорода и, в частности, вывести формулу Бальмера.

Метод состоял в том, чтобы решать уравнения движения электрона, считая, что входящие в него динамические переменные являются q-числами. Я работал всего в двух измерениях, но этого вполне хватало, чтобы получить нужный мне результат. Я уже знал от Гейзенberга о том, что Паули удалось применить соображения квантовой механики к атому водорода, т. е. оказалось, что я реально конкурирую с Паули.

Следует заметить, что, пока я работал с q -числами, появилась статья Ланцоша¹⁹, посвященная преобразованию гейзенберговских матриц в функции двух непрерывных переменных. Эта работа не произвела на меня большого впечатления, потому что показалась мне просто развитием математического аппарата, которое никак не могло способствовать продвижению в физике. Меня абсолютно устраивал мой собственный метод, но я был совершенно не прав, не придав значения работе Ланцоша, потому что на самом деле она оказалась очень важным шагом вперед, проложив путь для установленной впоследствии связи между гейзенберговскими матрицами и шрёдингеровской формой квантовой механики.

Закончив вторую статью, посвященную исследованию атома водорода, и вновь послав копию ее Гейзенбергу, я получил от него ответ, в котором он писал *):

«Вернувшись недавно в мир физики, я обнаружил Вашу последнюю статью об атоме водорода. Поздравляю Вас. Ваша работа привела меня в восхищение. Вы разделили задачу на две части: с одной стороны, Вы рассматриваете действия с q -числами, а с другой,— физическую интерпретацию q -чисел. Я считаю, что такое деление целиком отражает суть стоящей перед Вами математической задачи. Ваш подход к строению атома водорода отличает всего один шаг от вычисления вероятностей переходов, к которым Вы тем временем уже, конечно, подошли. Можно надеяться, что теперь все в полном порядке и, если Томас прав с объяснением множителя 2, скоро мы научимся работать со всеми моделями атомов».

Упоминание о множителе 2 связано с только что возникшим тогда предположением, что электрон обладает спином. Эта идея принадлежала Гаудсмиту и Уленбеку, которые с ее помощью сумели описать дублеты, наблюдаемые в спектрах щелочных элементов. Существование этих дублетов вполне объяснялось наличием у электрона спина, но величина дублетного расщепления получалась в два раза больше наблюдаемой. Томас показал, что множитель 2 возник из-за ошибки в вычислениях. Дело в том, что формула, по которой рассчитывалась прецессия спина, была написана в системе отсчета, где электрон покоятся, в то время как его движение должно учитываться.

Гейзенберг продолжает: «На самом деле, я пишу Вам, чтобы задать несколько вопросов. Несколько недель назад в журнале «Annalen der Physik» появилась статья Шрёдингера²⁰, написанная, как мне кажется, в духе квантовой механики. Не думали ли Вы о том, как описание атома водорода, приведенное Шрёдингером, соотносится с квантовой механикой? Эти математические вопросы особенно интересуют меня потому, что, по-моему, статья Шрёдингера может очень много дать для понимания физического смысла квантовой теории».

В ответ я написал, что теорией Шрёдингера не занимался. Вначале я был настроен к ней несколько враждебно. Я считал, что уже существует прекрасная квантовая механика, которую можно приспособить к решению всех задач атомной теории. Зачем отступать на догейзенберговскую позицию ко времени, когда не было квантовой механики, и пытаться построить ее заново? Меня просто возмущала мысль об отступлении и о том, что, может быть, придется начать все сначала, отказавшись от всех успехов, достигнутых с помощью новой механики. Довольно долго я и думать не хотел о том, чтобы браться за шрёдингеровский подход. Не помню точно, что я ответил Гейзенбергу, но мне пришел еще один ответ, датированный 26 мая **).

Письмо начиналось с подробного изложения связи шрёдингеровской теории с матричной механикой. Гейзенберг не поленился исписать две или три страницы, чтобы объяснить все детали, и очень мне этим помог.

*) Гейзенберг — Дираку, 9 апреля 1926 г., 2 с., по-немецки.

**) Гейзенберг — Дираку, 26 мая 1926 г., 4 с., по-немецки.

Дальше Гейзенберг соглашается с моими критическими замечаниями по поводу статьи Шрёдингера. Я писал, что волновая теория вещества должна быть так же противоречива, как и волновая теория света. Но на самом деле достижение теории Шрёдингера состоит в том, что одни и те же математические уравнения можно интерпретировать как уравнения механики точки в неклассической кинематике и как уравнения волновой теории Шрёдингера. Гейзенберг надеялся разрешить таким образом парадоксы квантовой теории. Он просил информировать его о том, что у меня получается с комптон-эффектом. «В Копенгагене широко обсуждают эту задачу и очень ею интересуются», — писал Гейзенберг.

Следует заметить, что я продолжал работать над теорией q -чисел и нашел способ сделать ее в какой-то степени релятивистской, исходя из тех первоначальных идей, появившихся у меня при чтении письма Гейзенberга в сентябре 1925 г., о которых я Вам вчера рассказывал.

В марте 1926 г. в Кембридж приехал Зоммерфельд и мне удалось с ним встретиться. 13 марта Эддингтон пригласил меня на чай, на котором Зоммерфельд тоже присутствовал. Я был очень рад этой встрече, потому что очень много узнал из его книги. Во время разговора я заявил, что решил квантовомеханическую задачу об эффекте Комптона. Тут Зоммерфельд вспыхнул и спросил: «А почему я об этом ничего не знаю?» Тогда присутствовавший на чаепитии Фаулер объяснил, что я только что кончил заниматься эффектом Комптона, и тем успокоил Зоммерфельда.

Завершив работу по теории комптон-эффекта, я ее вскоре²¹ опубликовал; это была та работа, на которую Гейзенберг ссылается в своем письме, и которую я писал для своей докторской диссертации. Диссертацию я закончил весной 1926 г. В Лондоне тогда происходили забастовка, и всех желающих приглашали в службу сервиса: водить поезда или автобусы, или еще что-нибудь делать для поддержания работы разных служб. Многие мои друзья и студенты откликнулись на этот призыв и бросили учиться, но я был слишком поглощен диссертацией и как будто прилип к ней. К июню 1926 г. моя диссертация была закончена.

III

Итак весной 1926 г. я написал докторскую диссертацию. Я упорно продолжал над ней работать, не обращая внимания на забастовку, которая проходила в это время в Англии и нарушала активность в очень многих местах. В диссертации я все же сделал несколько ошибок в общем описании q -чисел. Кроме того, в ней не упоминалась теория Шрёдингера. В прошлый раз я, кажется, говорил, что теория Шрёдингера меня оттолкнула при первом с ней знакомстве.

Я считал, что благодаря Гейзенбергу у нас есть прекрасные основы квантовой механики, которые можно спокойно развивать дальше, не испытывая ни малейшей потребности в их ревизии.

Однако в одном из писем Гейзенберг подробно объяснил мне, как связаны между собой теория Шрёдингера и матричная механика, и тогда я понял, что теория Шрёдингера вовсе не требует от нас забвения всего, что мы узнали из матричной механики, а напротив, служит дополнением матричной механики и дает очень мощные математические методы, в точности согласующиеся с идеями матричной механики.

После такого письма мои представления о теории Шрёдингера, конечно, совершенно изменились. Может быть, это произошло не сразу, но через некоторое время я с энтузиазмом взялся за теорию Шрёдингера и узнал о ней все, что мог. Мне нужно было выучить новый аппарат — аппарат собственных значений и собственных векторов. Шрёдингер знал эту технику еще в самом начале своего обучения, но в Кембридже она была известна очень плохо.

Овладев новой техникой, я задумался над тем, как бы ее использовать, и пришел к задаче об атомной системе, состоящей из многих одинаковых частиц. Я подумал, что может существовать волновая функция, симметричная или, наоборот, антисимметрическая относительно всех входящих в систему частиц. Эти задачи о симметрии могли таить в себе новые законы Природы. Изучая их следствия, я обнаружил, что симметричные волновые функции описывают частицы, подчиняющиеся в точности той статистике, которую впервые ввел Бозе, а впоследствии несколько уточнил Эйнштейн. Этот тип статистики был известен как статистика Бозе — Эйнштейна. Она описывала фотоны и давала объяснение закона Планка.

Но были и антисимметрические волновые функции, которым отвечала какая-то новая статистика. Я написал основные соотношения для этой новой статистики и опубликовал их.

Вскоре после публикации я получил письмо от Ферми. Ферми указывал, что предложенная мной статистика совсем не нова и что он сам ввел ее некоторое время назад. Ссылку на свою статью Ферми мне сообщил²². Просмотрев работу, я увидел, что Ферми прав. Статистика, которую он рассматривал, обладала тем свойством, что ни в одном состоянии не могло находиться больше одной частицы.

Читая работу Ферми, я вспомнил, что видел ее прежде, но совершенно забыл об этом. К сожалению, я обладаю одним недостатком: у меня не очень хорошая память и все, что в данный момент кажется мне несущественным, чаще всего вылетает из моей головы. При чтении статьи Ферми я не понял, какое значение она может иметь для любой из основополагающих задач квантовой механики — она казалась чем-то совершенно отдельным, стоящим в стороне и напрочь выпала из моей памяти. А к тому времени, когда я сам написал работу об антисимметрических волновых функциях, у меня не осталось никаких воспоминаний о ней.

В результате я отправил Ферми письмо, полное извинений. Я сознавал, что у Ферми были причины обидеться на меня, и я должен был его умиротворить. Наверное, Ферми меня простил, ибо больше не писал мне писем на эту тему, а потом, когда мы встретились, разговаривал со мной очень дружелюбно. Мы никогда не спорили о том, кто является автором вышеупомянутой статистики, и ее часто связывают с нами обоими. Однако из опубликованных материалов очевидно, что первооткрывателем был Ферми, а я в своей более поздней работе полазал, как новая статистика может быть согласована с квантовой механикой. Фактически, это было следствием квантовой механики, вытекающим из предположения, что волновые функции должны быть антисимметрическими.

После защиты диссертации я уже больше не был привязан к Кембриджу и мне захотелось попутешествовать. Больше всех других мест меня, конечно, тянуло в Гётtingен, на родину квантовой механики. В Гётtingене жил Гейзенберг, там были Борн и Иордан, активно участвовавшие в создании матричной механики. Но когда я заговорил на эту тему с Фаулером, то он посоветовал мне ехать в Копенгаген. У самого Фаулера были очень тесные связи с Копенгагеном, и он там часто бывал. Он рассказал мне о том, какой гостеприимный в Копенгагене Институт и как Бор тепло встречает всех приезжающих. В результате я никак не мог решить, куда мне ехать — в Копенгаген или в Гётtingен. Наконец я принял решение разделить предназначеннное для поездки время на две части и сначала съездить в Копенгаген.

Я отправился в Копенгаген в сентябре 1926 г. Мне там очень понравилось, потому что, как и говорил Фаулер, Институт оказался очень гостеприимным, а Бор меня чрезвычайно тепло принял. Мы с ним очень близко сошлись и подолгу разговаривали, причем говорил в основном Бор.

У Бора была привычка думать вслух, вся его гигантская работа мысли происходила вслух, и ему требовался собеседник, которым могла быть как целая аудитория слушателей, так и аудитория, состоящая всего из одного-двух

человек. Очень часто я становился такой аудиторией. Его мысли относились, я бы сказал, к философским проблемам, и как ни старался, понять их до конца я не мог. Я привык выделять из своих рассуждений те, которые можно записать в виде уравнений, а рассуждения Бора таили в себе гораздо более глубокий смысл и уходили весьма далеко от математики. Мне очень нравились наши отношения с Бором, и, повторяю, я не могу даже оценить, сколь сильно повлияло на мою работу то, что я слышал, как думал вслух Бор.

Еще одним человеком, которого я встретил в Копенгагене и который всегда оказывал очень сильное влияние на каждого, кто бы с ним ни познакомился, был Эренфест. Эренфест всегда стремился к абсолютной ясности в каждой детали дискуссии. Он возвращался к непонятному месту и буквально прилипал к нему, пока все не становилось совершенно ясным. Лишь тогда дискуссия могла продолжаться. На лекции, на коллоквиуме или на каком-нибудь мероприятии такого сорта Эренфест был самым полезным человеком. Он не только вскакивал с места, чтобы потребовать дальнейших разъяснений, если лектор выражался недостаточно ясно, но обладал и другими очень ценными качествами. Скажем, лектор при объяснении сильно вдавался в детали, и аудитория уже успела запутаться. Тогда Эренфест вставал, прерывал лектора, но так вежливо и дипломатично, что тот никогда не обижался, и говорил: «Я совершенно убежден в чрезвычайной важности Вашей работы, но мы предпочли бы изучить ее подробно потом, а сейчас нам не хочется вдаваться в детали. Не могли бы Вы перейти к обсуждению выводов и результатов?». Лектор, сраженный этим дипломатичным вмешательством, сразу переходил к результатам, а все присутствующие были признательны Эренфесту.

Случалось, что лектор делал слишком много предположений, таких, о которых многие слушатели ничего не знали. Тогда Эренфест опять прерывал его и просил объяснить непонятное место. И все опять были благодарны Эренфесту. Многие, наверное, нуждались в объяснении, но никто не решался об этом попросить, боясь проявить неуважение.

Эренфест в таких случаях говорил, что он ничего не имеет против насмешек. Иногда над ним смеялись, когда он просил объяснить что-нибудь очень простое. Но Эренфеста совершенно не трогали насмешки. Я никогда не встречал человека, который был бы к ним так равнодушен. Он говорил: «В конечном счете, неважно, что надо мной смеются. Для меня самое главное — понять этот пункт».

Если в аудитории присутствовал Эренфест, то мы могли быть уверены, что лекция будет интересной, что мы не потратим время на ненужные обсуждения, а лектор будет вынужден говорить лишь то, что нужно слушателям.

Я хочу еще рассказать кое-что о Нильсе Боре. Во время наших с ним дискуссий я узнал о том, какое недоразумение произошло когда-то между Бором и Томсоном. Бор сказал мне, что был горячим поклонником Томсона и меньше всего собирался критиковать его или обижать. Бору хотелось получить дальнейшие разъяснения по поводу атомных моделей Томсона, но он плохо знал английский язык и не мог задать свои вопросы столь вежливо, сколь хотел. В результате Томсон понял эти вопросы неправильно. Он решил, что его критiquют, и разозлился.

Происшедший инцидент сильно и надолго огорчил Бора. Мне кажется, что он всю жизнь расстраивался из-за этой истории и в дальнейшем всегда боялся, как бы она не повторилась. Когда бы он ни спрашивал очередного автора о его работе, он неизменно повторял: «Я вовсе не собираюсь критиковать Вас, я просто хочу узнать». Это выражение: «This is not to criticize but only to learn» — стало в Копенгагене крылатым. Нередко его произносили по-немецки: «Nicht um zu kritisieren, nur um zu lernen».

Я думаю, что эта фраза оказала свое действие и на Гейзенберга, потому что в письмах, о которых я вам рассказывал в предыдущих лекциях, Гейзенберг все время повторял: «Я совершенно не сомневаюсь в правильности Ваших результатов, но мне бы хотелось, чтобы Вы подробнее объяснили мне

это место». Он очень боялся сказать что-нибудь такое, что я бы воспринял как непосредственную критику и обиделся бы на нее. На самом деле, Гейзенбергу вовсе не требовалось быть столь дипломатичным. Я чрезвычайно гордился перепиской с ним и никогда не обиделся бы на открытую критику. Но он всегда старался не делать этого.

Еще одним человеком, оказавшим большое влияние на события, происходившие в Копенгагене, был Гамов. Он, как ребенок, всегда стремился к игре и во все ситуации вносил долю легкого юмора. Гамов очень любил рисовать Микки Мауса и очень способствовал нашим развлечениям. Ему принадлежали прекрасные идеи, развитие которых впоследствии привело к важным событиям в квантовой теории, но мне кажется, что ни одной по-настоящему глубокой работы он не сделал.

Коль скоро я взялся оценивать других физиков, нельзя не сказать о Шрёдингере. Мне кажется, что я никогда не видел его в Копенгагене, во всяком случае, я этого не припомню. Но мы немало встречались потом, и из всех знакомых физиков Шрёдингер был, наверное, больше других похож на меня. Я обнаружил, что с Шрёдингером я соглашался гораздо легче, чем с кем-нибудь другим. Дело, наверное, было в том, что мы оба очень ценили математическую красоту и воплощение этой красоты в нашей работе. Для нас было символом веры то, что все уравнения, описывающие фундаментальные законы Природы, должны отличаться математической красотой. Это было для нас почти религией, причем очень полезной, ибо ее можно считать основой многих наших успехов.

Когда вы читаете о работах Шрёдингера, вас может удивить одно обстоятельство. Шрёдингер пришел к квантовой механике через волновое уравнение де Броиля, которое было релятивистским. Шрёдингер находился под большим впечатлением красоты релятивистской теории относительности, и возникает вопрос, почему так случилось, что работа Шрёдингера, где он вводит волновое уравнение, написана в нерелятивистском духе. Здесь кроется какое-то противоречие.

Много лет спустя, не помню точно, но примерно году в 1940-м, близка познакомившись с Шрёдингером, я узнал от него, в чем было дело. Он рассказал, что работал тогда в релятивистском подходе, навеянном работами де Броиля, и, вводя электромагнитные потенциалы, пришел к релятивистскому волновому уравнению, которое оказалось обобщением уравнения де Броиля. Первый его порыв был посмотреть, что получится, если с помощью этого уравнения рассчитать атом водорода. Произведя расчеты, Шрёдингер обнаружил, что результаты не согласуются с опытом.

Он был сильно разочарован и, решив, что его волновое уравнение никуда не годится, отказался от него. Взглянув на это уравнение по-новому через несколько месяцев, Шрёдингер заметил, что если понизить точность и перейти к нерелятивистскому приближению, то результаты согласуются с экспериментальными данными, конечно, в пренебрежении релятивистскими эффектами. Таким образом, волновое уравнение Шрёдингера в нерелятивистском виде согласовывалось с экспериментом, и его можно было публиковать.

Причиной того, что первоначальное, релятивистское уравнение Шрёдингера не согласовывалось с экспериментом, был, конечно, неучтенный спин электрона. Мысль о том, что у электрона есть спин, была тогда совершенно новой, и Шрёдингер мог о ней даже не слышать, а в то время у него не хватало смелости публиковать уравнение, которое давало результат, наверняка противоречащий эксперименту.

Впоследствии Клейн и Гордон воскресили релятивистское уравнение Шрёдингера и опубликовали его. С тех пор оно называется уравнением Клейна — Гордона и используется для описания заряженной релятивистской частицы, спин которой равен нулю. Поскольку подобной заряженной частицы тогда не знали, работа Клейна и Гордона сыграла роль лишь в развитии математического аппарата и не имела непосредственного физического приме-

нения. Таким образом, у Клейна и Гордона хватило смелости опубликовать уравнение, не имеющее никакого отношения к экспериментальным результатам, а у Шрёдингера этой смелости не было.

Вернемся к моей жизни в Копенгагене. Несмотря на встречи и дискуссии с многими выдающимися физиками, я в основном продолжал работать сам, разрабатывая собственные идеи. Я занимался вопросом физической интерпретации квантовой механики. Существовали уравнения, основу которых составляли некоммутирующие величины, которые я назвал q -числами, но получить из этих уравнений результаты, не противоречащие экспериментально наблюдаемым, можно было только с помощью специальных правил. Было совершенно необходимо собрать все правила воедино и выработать какой-то общий метод физической интерпретации. Я некоторое время занимался этой задачей и написал статью, содержащую полученные мной результаты.

Должен сказать, что такого удовольствия от работы я не получал ни до, ни после этой статьи, хоть писал и другие работы по квантовой механике. Вы можете, конечно, этому удивиться. Дело в том, что многие мои статьи были просто следствиями какой-то идеи, неожиданно пришедшей мне в голову. Именно такое происхождение имела, например, моя ранняя работа о скобках Пуассона или, другой пример, более поздняя, о релятивистском волновом уравнении. Обе они стали следствием идеи, осенившей меня внезапно. Я не мог точно объяснить, как это произошло, и считал, что работы такого сорта имели незаслуженный успех. С другой стороны, успех моей работы о физической интерпретации квантовой механики был заслуженным. Здесь я встретился с задачей, которую можно было решить без ухищрений: решение состояло из ряда этапов, которые следовало преодолевать один за другим. В процессе работы я все время сталкивался с выбором новых обозначений для удобной записи уравнений, которыми я занимался. Эти обозначения приходилось часто усовершенствовать. Постепенно, шаг за шагом, дело продвигалось по довольно логичной схеме, и в результате получалась работа, которая ложилась в основу общей теории преобразований квантовой механики и, вместе с тем, демонстрировала достоинства новой системы обозначений.

По поводу обозначений должен сказать, что мне приходилось придумывать символы, в которых должна явно содержаться информация о том, что важно выделить именно в явной форме, оставляя при этом понятными все те величины, которые без ущерба для понимания достаточно просто удерживать в памяти. В результате появились обозначения, ставшие в наше время с небольшими изменениями стандартными обозначениями квантовой механики.

Время, проведенное мною в Копенгагене, было очень удачным, потому что я развел тогда общие идеи физической интерпретации квантовой механики—работа, доставившая мне столько удовольствия, и обратился к квантовой теории излучения. Я показал ее прямую связь со статикой Бозе — Эйнштейна, которая становится ясной при работе с волновыми функциями, симметричными относительно перестановки частиц.

В процессе работы мне пришла в голову одна из неожиданно откуда-то родившихся идей. Я подумал: «Что будет, если взять волновое уравнение Шрёдингера и попробовать применить процесс квантования к самой волновой функции. Всегда считалось, что волновая функция выражается обычными, т. е. c -числами. Возникает вопрос, что будет, если превратить их в q -числа и предположить, что они не коммутируют со своими сопряженными?».

В результате возникла теория, эквивалентная теории излучения, которой я занимался, и появился альтернативный подход к задаче. Так возник метод, известный как теория вторичного квантования.

К концу моего пребывания в Копенгагене, кажется, в январе 1927 г., в Копенгаген приехал Паули. Я рассказал ему свою работу о физической интерпретации квантовой механики и теории преобразований и мы обсудили, как все эти идеи можно было бы применить к изучению спина электрона. В

результате мы пришли к тому, что для описания трех компонент спина необходимо ввести три переменных σ . Мне кажется, я пришел к этим переменным независимо от Паули, но, наверное, и Паули придумал их независимо от меня.

Вскоре после отъезда из Копенгагена Паули опубликовал статью²³, в которой он нерелятивистским путем включил спин электрона в волновую функцию. Зоммерфельд в книге «Строение атома и спектры» (т. 2)²⁴, ссылаясь на эту статью, пишет: «Открытие уравнения Паули было важным шагом к познанию действительной природы электрона, т. е. к уравнению Дирака».

Это утверждение неверно в той его части, где речь идет обо мне. Я не думал о том, чтобы включить спин электрона в волновое уравнение, и вообще не занимался этой задачей. Я никак не использовал работу Паули, потому что меня в основном интересовало построение релятивистской теории, которая согласовывалась бы с моей общей физической интерпретацией квантовой механики и с моей теорией преобразований. Я считал, что надо решить сначала эту задачу для какого-нибудь простейшего случая, скажем, для спиновой частицы, и лишь потом думать о том, как включить спин. Я был крайне удивлен, когда потом обнаружил, что спин появился в самом простом случае.

В связи с релятивистским волновым уравнением я должен заметить, что Крамере говорил мне (через несколько лет после появления моего уравнения), что он независимо получил уравнение второго порядка, которое было эквивалентно моему уравнению первого порядка. Возможно, Крамере исходил из уравнения Паули. Он не опубликовал свою работу, потому что она перекрывалась моей.

В начале февраля 1927 г. я выехал из Копенгагена в Гётtingен и проезжал через Гамбург. В это время там происходил съезд Немецкого Физического общества, и я несколько дней принимал в нем участие. На этом съезде в основном обсуждались экспериментальные результаты по атомным спектрам. Тем не менее, у меня была возможность оценить работу немецких физиков. Мне показалось, что они работали очень много, подолгу слушали лекции, но при этом вовсе не выглядели утомленными. В них таилась колоссальная энергия.

Из Гамбурга в Гётtingен я ехал в вагоне четвертого класса вместе с другими физиками, возвращавшимися в Гётtingен с Гамбурского съезда. Среди них был Робертсон, с которым потом я сошелся довольно близко, будучи в Принстоне. Робертсон занимался космологией и от него я почерпнул свой первый интерес к космологическим моделям Вселенной.

Прибыв в Гётtingен, я провел там несколько месяцев. Здесь царил более формальный дух, чем в Копенгагене. В Гётtingене у меня прибавилось математического образования. Я посещал курс лекций по теории групп, который читал Вейль, по разным поводам встречался с Гейзенбергом и Бором. Кроме того, я познакомился с Оппенгеймером и мы стали близкими друзьями, так как жили в одном и том же пансионе и поэтому очень часто встречались.

Должен сказать, что, покинув Кембридж, я оставался верен своему обычному образу жизни, я много занимался и делал расчеты в обычные дни, а по воскресеньям отдыхал, совершая длинные загородные прогулки. В Копенгагене я совершал эти прогулки не всегда в одиночестве — время от времени ко мне присоединялся Бор. Он тоже очень любил ходить, и мы с ним много раз подолгу с удовольствием гуляли вместе. Иногда в Институте собиралась целая группа для выезда за город и получалось что-то вроде экскурсии, которая всех нас очень взвадривала.

Эти прогулки я не бросил и в Гётtingене. Иногда в них принимал участие Оппенгеймер. Мне особенно запомнилась одна наша вылазка на пасху в 1927 г. В то воскресенье мы прошли огромное расстояние.

Будучи в Гётtingене, я получил от Эренфеста приглашение посетить его институт в Лейдене. Оппенгеймер тоже был приглашен, и в июне 1927 г.

мы вместе отправились в Лейден. Несколько дней мы провели у Эренфеста в его институте, и еще съездили на один день в Уtrecht к Крамерсу.

В октябре 1927 г. я поехал в Брюссель на Сольвеевский конгресс. Эта поездка мне очень много дала, потому что я встречался с многими выдающимися физиками, среди которых были Эйнштейн и Лоренц. Кое-что из происходившего на конференции я хорошо помню. Я делал доклад о методе вторичного квантования, после чего кто-то сказал, что существует аналогичный метод вторичного квантования для статистики Ферми, который предложили Иордан и Вигнер.

Вначале работа Иордана и Вигнера мне не понравилась. Я думаю, что в этом повинно мое мышление, которое было сугубо геометрическим, а не алгебраическим. В случае бозе-статистики и связанного с ней вторичного квантования существовала определенная картина, отражающая определенные свойства уравнений: теорию можно приложить к ансамблю осцилляторов. Для ферми-статистики такая картина отсутствовала. Я считал это серьезным недостатком, и поэтому не мог оценить важность нового типа вторичного квантования.

На самом деле, его глубокий смысл был в том, что два типа вторичного квантования очень тесно связаны друг с другом с чисто алгебраической точки зрения. Возьмем основные уравнения

$$\psi_n \psi_m - \psi_m \psi_n = 0, \quad \bar{\psi}_n \psi_m - \psi_m \bar{\psi}_n = \delta_{nm}. \quad (14)$$

Они похожи на уравнения, которые получаются при квантовании обычной шрёдингеровской волновой функции. Их можно связать с уравнениями, описывающими гармонические осцилляторы, когда каждому состоянию ψ_n отвечает один осциллятор.

Для вторичного квантования другого типа имеем почти такие же уравнения

$$\psi_n \psi_m + \psi_m \psi_n = 0, \quad \bar{\psi}_n \psi_m + \psi_m \bar{\psi}_n = \delta_{nm}, \quad (15)$$

в которых лишь знак «минус» заменен знаком «плюс». Это и есть та чрезвычайно тесная аналогия между обоими типами вторичного квантования, которая выявляется при алгебраическом подходе. Если вы попытаетесь построить наглядную картину для обоих типов уравнений, то в случае статистики Бозе это удастся, а для статистики Ферми такой картины нет. Однако важна их алгебраическая структура, ибо именно благодаря ей вторичное квантование для систем, подчиняющихся статистике Ферми, оказывается столь же важным, сколь для систем, подчиняющихся бозе-статистике.

На Сольвеевском конгрессе 1927 г. обсуждался еще один важный вопрос — о физической интерпретации квантовой механики. Разгорелось, конечно, немало дискуссий между теми, кто считал, что результаты квантовомеханического подхода должны содержать неопределенность, и теми, кто выступал против возникновения какой бы то ни было неопределенности в фундаментальных явлениях природы. Я высказал свою точку зрения, основанную на моей работе об общей интерпретации квантовой механики. Эта работа сразу привела к возможности интерпретации нами квадрата модуля волновой функции как вероятности получения определенного результата в любом наблюдении над атомной системой. Следует заметить, что к тому же заключению в применении к теории рассеяния независимо пришел и Бор. С появлением вероятностной интерпретации пришлось примириться с тем, что результаты наблюдений могут оказаться неопределенными. Я выразил суть создавшейся ситуации, сказав, что при этих условиях «Природа делает выбор». По-моему, эта фраза удачнее всего выражает ту неопределенность, с которой мы сталкиваемся в атомной теории. Бывают случаи, когда мы вынуждены признать, что Природа делает выбор, но не может предсказать, что это за выбор.

. Я помню один случай, который произошел на Сольвеевском конгрессе 1927 г. Однажды перед началом лекции ко мне подошел Бор и спросил: «Чем Вы сейчас занимаетесь?» Я ответил: «Пытаюсь построить релятивистскую теорию электрона». Бор тогда сказал: «Но ведь Клейн уже решил эту задачу».

Я был несколько обескуражен и начал объяснять, что решение Клейна, основанное на уравнении Клейна — Гордона, неудовлетворительно, так как его нельзя согласовать с моей общей физической интерпретацией квантовой механики. Мне, однако, почти ничего не удалось объяснить, потому что наш разговор был прерван началом лекции, и вопрос повис в воздухе.

Эта задача интересовала меня тогда больше всего: как построить удовлетворительную релятивистскую теорию электрона? Я владел общей физической интерпретацией квантовой механики, в правильности которой я был уверен, но она предписывала работать с волновой функцией, линейной по оператору d/dt , для которой $d\psi/dt$ равно некоторой определенной функции от ψ . Теперь смотрите. В уравнение Клейна — Гордона входит $d^2\psi/dt^2$, что никак не могло согласоваться с моей общей интерпретацией. Попытки добиться согласования приводили к вероятности, которая могла иногда принимать отрицательные значения, а это, конечно, лишено физического смысла.

Пытаясь преодолеть эту трудность, Клейн и Гордон заявили, что величина, которую я считал вероятностью, на самом деле является плотностью заряда. Уравнение следовало применять к ансамблю частиц, и предлагалось выражение для плотности заряда, которая могла быть как положительной, так и отрицательной, если допускалось существование частиц как с положительным, так и с отрицательным зарядом.

Меня это далеко не устраивало. Что было толку от теории нескольких частиц, если еще не существовало теории одной частицы. Теория не могла считаться логичной, если она была неприменима к одной частице. С другой стороны, рассматривая всего одну частицу, мы должны были уметь вычислять для нее вероятности, причем вероятности должны были получаться положительными, откуда следовало, что в волновую функцию могла входить только производная $d\psi/dt$.

В течение нескольких месяцев эта задача оставалась нерешенной и ответ возник совершенно неожиданно, явив собой один из примеров незаслуженного успеха. Идея решения пришла мне в голову, когда я развлекался с математическими формулами. Для описания спина электрона мне нужны были три компоненты $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. По-всякому переставляя их, я заметил, что если записать выражение $\sigma_1 p_1 + \sigma_2 p_2 + \sigma_3 p_3$, где p_1, p_2 и p_3 — три компоненты импульса, и возвести его в квадрат, то получится просто квадрат импульса $p_1^2 + p_2^2 + p_3^2$. Таким образом, я получил красивый математический результат, и был этим сильно возбужден. Мне казалось, что мой результат должен быть важным, несмотря на то, что он не давал непосредственного ответа на вопрос, как построить удовлетворительное релятивистское уравнение для электрона.

Фактически, я придумал метод, с помощью которого квадратный корень из суммы трех квадратов записывался в виде линейного выражения. Но если нам пришлось бы иметь дело с релятивистской теорией частицы, то сумма под знаком квадратного корня содержала бы квадраты четырех величин, а для вычисления корня из суммы четырех квадратов мой метод был совершенно непригоден. Появилась интересная математическая задача, но у меня не было способа решения всей проблемы.

Я провел много времени, изучая возникшую трудность, когда мне пришло вдруг в голову, что нет никакой необходимости ограничивать себя величинами σ , которые записываются в виде матриц всего из двух рядов и двух строк. Почему бы не перейти к четырем рядам и четырем строкам? Ведь никаких математических возражений не было. Заменив σ матрицы матрицами из четырех рядов и четырех строк, можно было с легкостью вычи-

слить квадратный корень из суммы четырех, а если нужно, даже пяти квадратов.

Так возникло новое волновое уравнение электрона, линейное по четырем компонентам релятивистского 4-вектора энергии-импульса. Это волновое уравнение имело следующий вид:

$$(p_0 - \alpha_1 p_1 - \alpha_2 p_2 - \alpha_3 p_3 - \alpha_4 mc) \psi = 0. \quad (16)$$

Я думаю, что все вы его знаете. Волновая функция ψ имеет четыре компоненты, соответствующие четырем строкам и четырем рядам матриц, о которых мы уже говорили, а каждая из компонент в отдельности удовлетворяет уравнению де Бройля.

Итак, у меня получилось уравнение для одной частицы в отсутствие электромагнитного поля. Чтобы теперь извлечь из него что-нибудь интересное, нужно было ввести электромагнитное поле. Существовала общая задача: как ввести в теорию электромагнитное поле, если известна теория одной частицы в отсутствие электромагнитного поля. С этой задачей я уже сталкивался и думаю, что впервые она появилась в моей работе об эффекте Комptonа. Там требовалось ввести в описание движения частицы электромагнитные потенциалы, сохранив при этом гамильтонову форму уравнений.

Столкнувшись впервые с этой задачей, я взялся за решение, не потрудившись поискать в литературе, не решил ли кто-нибудь ее до меня. Записать в гамильтоновой форме релятивистские уравнения движения частицы — задача классической механики, и я думаю, что она была решена где-то в начале нашего века, но я никогда не задумывался о том, чтобы посмотреть, кто справился с ней первым. Это дело историков науки, а я продолжал решать задачу сам, что не составляло большого труда и, наверное, было действительно проще, чем просматривать ссылки.

Для нового волнового уравнения, линейного по переменным p^2 , я опять воспользовался тем же методом. Требовалось лишь заменить каждое p на выражение $p + (e/c) A$, где через A обозначен электромагнитный потенциал.

Тут я заметил, что у меня получилось очень удачное уравнение. Из него автоматически следовало, что спин электрона равен половине, в полном соответствии с требованиями эксперимента, и, кроме того, что электрон обладает магнитным моментом. С помощью этого уравнения я рассчитал в первом приближении атом водорода, и мой результат согласовывался с тем, что давал опыт.

Тогда я написал и опубликовал статью, в которой атом водорода рассматривался в первом приближении. Вы спросите, почему я сразу не перешел к рассмотрению высших приближений? Причина была в том, что я просто боялся. Я боялся, что в высоких приближениях результат окажется не вполне правильным, и был столь счастлив, что теория верна хотя бы в первом приближении, что хотел закрепить успех публикацией в том виде, в котором работа уже была, не подвергаясь риску неудачи в высших приближениях. Высшие приближения были сделаны позже Дарвином, который писал и рассказывал мне о своих результатах. Я был рад услышать, что все согласуется с опытом. Автор новой идеи всегда побаивается возникновения какого-нибудь новшества, которое погубит его идею, а любой другой человек, свободный от таких страхов, может более решительно внедряться в новые области.

Существовавшая тогда волновая функция электрона была во многом вполне удовлетворительна, но обладала одним серьезным недостатком: внутреннее движение электрона описывалось матрицами, построенными из четырех строк и столбцов, а для описания двух спиновых состояний электрона, которые наблюдались экспериментально, требовались матрицы, состоящие всего из двух строк и столбцов. В результате это волновое уравнение дает в два раза больше состояний, чем необходимо для описания экспериментальной ситуации. После пристального изучения вы обнаружите, что половина состояний соответствует отрицательным значениям энергии. Надо было те-

перь просто исключить эти ненаблюдаемые состояния с отрицательными энергиями, и ограничиться состояниями с положительными энергиями. Тогда у нас получилась бы теория, в которой все величины можно увидеть на опыте.

Однако сделать это не так просто, потому что между состояниями с положительными и отрицательными энергиями могут возникнуть переходы. В классической теории тоже существуют состояния с отрицательной энергией, но там ими можно пренебречь, потому что отсутствуют переходы из состояний с положительной энергией в состояния с отрицательной энергией. В квантовой теории такие переходы должны учитываться.

Они возникают сравнительно редко, когда в излучении отсутствуют очень высокие частоты, и если просто пренебречь этими переходами, то можно построить приближенную теорию. Какое-то время именно так и приходилось поступать.

Шредингер предложил модифицировать теорию, исключив переходы между уровнями с положительной и отрицательной энергией. Однако для этого пришлось видоизменить волновое уравнение, в результате чего был испорчен его релятивистский характер и нарушена его красота. Такой путь не дает удовлетворительного объяснения.

Проблема состояний с отрицательной энергией довольно долго оставалась для меня загадкой. Основной метод ее решения состоял в том, чтобы как-то избежать переходов в состояния с отрицательными энергиями, я же подошел к задаче с другой стороны. Примирившись с тем, что из математической теории эти состояния исключить нельзя, я решил попытаться найти физическое объяснение их существования.

Сделать это было не так уж трудно, вспомнив, что электроны подчиняются статистике Ферми, согласно которой ни в каком состоянии, не может находиться больше одного электрона. Так я пришел к картине мира, в котором заняты все состояния с отрицательной энергией и в котором электрон, находящийся в состоянии с положительной энергией совершить переход в состояние с отрицательной энергией не может. Разумеется, нам придется рассмотреть возможность того, что некоторые из состояний с отрицательной энергией окажутся свободными. Возникнут дырки, которые ведут себя как частицы, но уже с положительной энергией.

Реально было не так уж трудно прийти к этой идеи: мы хорошо понимали, что нужно получить, и существовала очень близкая аналогия с теорией химической валентности. Электроны в инертном газе заполняют замкнутые оболочки. У щелочных элементов один или два электрона располагаются вне заполненной оболочки. Эти электроны химически активны, и они же наиболее активно участвуют в образовании спектров. Теперь мы должны учесть возможность появления в заполненной оболочке дырки — картина, соответствующая атомам галогенов. Полученное из химической теории атомов представление о таком родстве дырок и электронов можно было непосредственно применить к состояниям с положительной и отрицательной энергией, поэтому мне не пришлось особенно напрягать воображение, чтобы придумать теорию, в которой заняты почти все состояния с отрицательной энергией.

Как только у меня возникла такая идея, я, конечно, сразу подумал о том, что состояния с отрицательной энергией должны соответствовать частицам, имеющим массу, равную массе электрона, но, в отличие от электрона, заряженным положительно. Однако здесь скрывалась серьезная трудность. В то время были известны электроны, несущие отрицательный заряд, и протоны, несущие положительный заряд, и каждый был абсолютно уверен, что кроме электрона и протона других элементарных частиц в Природе нет. Правда, Резерфорд иногда рассматривал возможность существования третьей частицы — нейтрона. Но это предположение гипотетического нейтрона не имело никаких оснований. Резерфорд просто говорил о том, как бы полезен нейtron для экспериментаторов в качестве идеального снаряда для стрель-

бы по атомным ядрам: полет нейтрона не возмущался бы внешними электронами. Но никто реально не верил в нейtron. Всем казалось очевидным, что, поскольку есть два сорта электричества, должно быть и два сорта частиц для его переноса. Никто не шел дальше.

Что же мне было делать с дырками? Лучшее, до чего я мог додуматься — предположить, что масса дырки не равна массе электрона. Нельзя забывать, что в моей достаточно примитивной теории пренебрегалось кулоновскими силами, действующими между электронами, а они как-то могли привести к различию масс электрона и дырки.

Как именно следует вводить эти силы в теорию, я не знал, но мне казалось, что они как-то могли бы создать различие в массах электрона и дырки.

Все же было очень трудно понять, почему эта разница так велика. Требовалось ведь, чтобы масса протона почти в 2000 раз превышала массу электрона. Трудно представить себе, чтобы такая огромная разница была связана с кулоновскими силами между электронами, влияние которых описывается теорией возмущений. Однако я не намеревался отвергать теорию и выдвинул ее как теорию электронов и протонов. Разумеется, очень скоро на меня начались нападки по поводу того, что масса дырки отличается от массы исходного электрона. Я думаю, что наиболее определенно высказался Вейль. Он указал, что математически дырки должны иметь ту же массу, что и электроны, эта точка зрения стала общепринятой.

Оппенгеймер предложил такую теорию, в которой дырки имеют ту же массу, что и электроны, но в Природе существуют какие-то особые причины, чтобы дырки нельзя было наблюдать. Он не мог объяснить эти особые причины, а сказал о них как о чем-то, что нужно еще объяснить в будущем. Оппенгеймер был очень близок к истине. Дырки эти были частицами с той же массой, что и электрон, а не наблюдали их просто потому, что экспериментаторы никогда не искали их в правильном месте.

Я вспоминаю, что когда посещал лекции экспериментаторов в Кавендишской лаборатории, был случай (я не очень помню случилось ли это в 1926-м или в 1927 г.), когда в разговоре после лекции лектор отметил удивительный факт, с которым он столкнулся в своих опытах. Он имел дело со следами частиц в камере Вильсона. В присутствии магнитного поля все следы были искривлены. Ясно, что если известен заряд частицы, то известно, в какую сторону она двигалась. Замечание состояло в том, что часто наблюдались треки, которые вели в источник. Предполагалось, что эти частицы — электроны, а тогда искривление следа указывало, что они летят в источник.

Все это было замечено мимоходом. Никто не думал исследовать явление подробно, а если бы они это сделали, то пришли бы к важному открытию. Частицы, которые считались электронами, летящими в источник, на самом деле вылетали из него. Они были заряжены положительно и имели массу, равную массе электрона.

Это показывает, как можно просмотреть важное открытие из-за того, что люди не уделяют достаточного внимания факту, который выглядит как курьез, не **стбящий** дальнейшей проверки.

Я думаю, что продолжение этой истории вы все знаете. Положительно заряженная частица, имеющая ту же массу, что электрон, была открыта через несколько лет. На самом деле, впервые ее наблюдал Блэкett. Он получил снимок, но, будучи осторожным человеком, не хотел публиковать свой результат до его подтверждения. Андерсон оказался смелее и, получив такой же результат, опубликовал его²⁵, заслужив славу первооткрывателя позитрона. Этим было положено начало открытию, огромного количества новых частиц. Были открыты нейтрон, мезоны разных типов, другие новые частицы, открытия продолжаются и по сей день.

Совершенно удивительно, как резко с конца 20-х годов изменилось общественное мнение относительно новых частиц. Тогда считалось практически совсем очевидным, что не может существовать никаких частиц, кроме эле-

ктронов и протонов. С тех пор все перешли на диаметрально противоположную точку зрения и при малейшем экспериментальном или теоретическом указании стремятся «постулировать» новую частицу. Число частиц, которые относятся к фундаментальным, сейчас поднялось до нескольких сотен, вместо двух, которые были вначале.

Теперь я подошел к концу рассказа о том времени, которое я назвал необычайной эпохой. Это было время быстрого развития теоретических идей в фундаментальных основах нашего понимания атома. С тех пор физика, разумеется, не прекращала своего развития, но оно шло совсем другими путями. Экспериментаторы все больше овладевали положением. Они ставят много экспериментов и сообщают о результатах наблюдений.

Положение теоретиков теперь не настолькоочно прочно, чтобы опровергать эти результаты, поэтому им приходится верить экспериментаторам и, создавая теории, делать все возможное, чтобы эти теории отвечали экспериментальным данным. Таким образом, львиная доля работы теоретиков состоит в том, чтобы строить теории, которые могли бы объяснить существование несметного количества новых частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ *)

1. Holt o n G. //History of Twentieth Century Physics: Proceedings of the International School of Physics «Enrico Fermi». Course LVII.— New York: Academic Press, 1977.— P. 266.
2. М и лль Дж. Система логики силлогистической и индуктивной.— 2-е изд., вновь обработ.— М.: Г. А. Леман, 1914.
3. H o d g e J. //J. London Math. Soc. 1959. V. 34. P. 111.
4. C unningham E. Relativity, the Electron Theory and Gravitation.— 2nd ed.— London: Longmans, Green and Co., 1921.
5. E d d i n g t o n A. S. The Mathematical Theory of Relativity.— Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1924; перевод: Э ддингтон А. С. Теория относительности.— Л.; М.: ОНТИ; 1934.
6. D irac P. A. M. //Phil. Mag. 1924. V. 47. P. 1158.
7. B o h r N., Kramers H., Slat er J. //Ibidem. P. 785.
8. B othe W., Geiger H. //Naturwissenschaften. 1925. Bd 13. S. 440.
9. Sh ankland R S. //Phys. Rev. 1936. V. 49. P. 8.
10. D irac P. A. M. //Nature. 1936. V. 137. P. 298.
11. D e B r o g l ie L. //C.R. Ac. Sci., Paris. 1923. T. 177. P. 507.
12. S o mmerfeld A. Atomic Structure and Spectral Lines.— London: Methuen. 1923; перевод: З оммерфельд А. Строение атома и спектры.— М.; Л.; Госиздат, 1926.
13. Heisenberg W. //Zs. Phys. 1925. Bd 33. S. 879; перевод://УФН. 1977. Т. 122. С. 574.
14. D irac P. A. M. //Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1926. V. 111. P. 405.
15. У иттeker Е. Т. Аналитическая динамика.— М.; Л.: ОНТИ, 1937.
16. D irac P. A. M. //Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1925. V. 109. P. 642; перевод://УФН. 1977. Т. 122. С. 611—621.
17. B orn M., Jord an P. //Zs. Phys. 1925. Bd 34. S. 858.
18. B orn M., Heisenberg W., Jord an P. //Ibidem. 1926. Bd 35. S. 557.
19. Lanczos K. //Ibidem. S. 812.
20. Schrödinger E. //Ann. d. Phys. 1926. Bd. 79. S. 301.
21. D irac P. A. M. Quantum Mechanics: Dissertation.— Cambridge University, May 1926.
22. Fermi E. //Zs. Phys. 1926. Bd 36. S. 902.
23. Pauli W. //Ibidem. 1927. Bd 43. S. 601.
24. S o mmerfeld A. Atombau und Spectrallinien. II; перевод: З оммерфельд А. Строение атома и спектры. Т. 1—2.— М.: Гостехиздат, 1956.
25. A nderson C. D. //Science. 1932. V. 76. P. 238.

*) Составлен переводчиком. (Примеч. ред.)