

Воспоминания о необычайной эпохе

I

Я счастлив, что приехал в Варенну на летнюю школу. Я многое здесь получил: 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 вопросы: куда идти дальше? Какие применения можно найти этому новому открытию? Сколь 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 иногда на ложные тропы,— об этом не хочется теперь даже вспоминать. Ему, может быть, даже стыдно, он разочарован в себе из-за того, что 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.

*) Recollections of an Exciting Era // History of Twentieth Century Physics: Proceedings of the International School of Physics «Enrico Fermi». Course LVII.— New York; London: Academic Press, 1977.— P. 109—146. Перевод на русский язык: Успехи физ. наук.— 1987.— Т. 153, № 1.— С. 105—134.

Я озаглавил свою лекцию «Воспоминания о необычайной эпохе». Началом этой эпохи следует считать 1919 год. Тогда произошло удивительное событие. В мир с 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 самых разных специальностей.

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 изменялась 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 о ней забыть. И тогда возникла теория относительности, замечательная идея, открывающая 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 широких слоев публики, не производила равного по своей силе эффекта.

Этот эффект был вызван одновременно и специальной, и общей теорией относительности. На самом деле специальная теория относительности восходила к 1905 году 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 вызвала 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 вышедших тогда статьях по теории относительности можно почерпнуть из доклада Холтона [1]. Он прочел

отрывок из сочинений сэра Оливера Лоджа, который весьма критически воспринимал теорию относительности. Ясно, что в сочинениях такого рода 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 Брода. Брод 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. Брод читал курс из десяти или двенадцати лекций, в которых он рассматривал теорию относительности с философских позиций. Я выдержал до конца, изо всех сил пытаюсь понять философию. Мои сокурсники — инженеры с 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 и 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, в частности Брод.

Надо сказать, что он не только рассказывал об общефилософском подходе, но и давал кое-какую точную информацию как о специальной, так и об общей теории относительности. Я помню, как Брод (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: 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 существовало какое-нибудь соотношение, то обе эти величины должны были бы входить в него со знаком плюс. Нетрудно понять, что такой подход неправилен, так как сколько-нибудь большое изменение времени приведет к абсурду.

Пожалуй, стоит пояснить, что я всегда очень интересовался геометрией. Эта область математики 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, следуя древней школе греков. Те же, кто интересуются алгеброй, ближе к народам Азии, что соответствует истокам 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, я был склонен к геометрии и в этом отношении не изменился.

Формула, написанная Бродом на доске, несомненно, позволила мне по-новому взглянуть на геометрию. Я вспоминаю — еще в школе один из учителей математики сказал, что меня, наверно, 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 каких-нибудь наборов аксиом. И это также сохранилось у меня на всю жизнь. Я интересовался реальным физическим миром, а не чисто логическими построениями. Такой интерес к реальному миру, естественно, объяснялся инженерным образованием, которое я получил.

Теперь, приобретя с помощью формулы, которую написал на доске Брод, новый взгляд на мир, я вскоре смог сам выводить основные уравнения специальной теории относительности.

Итак, я окончил инженерный факультет. 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 результат становится невыносимо уродливым, а 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, достаточно много красоты. Возьмем такую задачу: размещение намотки в роторе динамомашин. Решение этой задачи связано с математикой, которая оперирует лишь целыми числами, но все же обладает определенной красотой.

Таким образом, мои взгляды стали совсем другими. Постепенно они изменились 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 прибли-

женные, и я заподозрил, что 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 объекты для попыток их усовершенствования.

Если бы не инженерное образование, я, наверное, никогда не добился бы успеха в своей последующей деятельности, потому что достижение успеха требовало отказа от точки 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 получены. Отыскав уравнения, инженер брался за логарифмическую линейку и получал необходимые ему результаты.

Все сказанное убедило меня, что инженерный подход — наилучший. Мы стремились к описанию Природы. Нам хотелось найти уравнения, которые описывали бы Природу, и лучшими оказывались обычно приближенные уравнения. Приходилось смиряться с отсутствием строгой логики и ограничивать себя придумыванием уравнений, которые были бы способны описывать Природу.

После окончания инженерного курса я остался еще на два года в Бристольском университете для изучения математики. В течение этого времени наибольшее влияние оказал на меня 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 некролог [3]. В этом некрологе Ходж воздавал должное Фрейзеру как великому педагогу.

Фрейзер научил меня двум вещам. В первую очередь он научил меня строгости математики. Прежде я прибегал только к нестрогим рассуждениям, которые вполне удовлетворяли инженеров, стремившихся лишь к практическим результатам. Их не интересовало точное определение предела, как суммируются ряды и тому подобное. Фрейзер же учил нас, что иногда анализ таких задач требует строгих логических рассуждений.

Надо сказать, что в следующей 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 для того, чтобы сделать какие-либо утверждения. Я просто считаю, что это именно та 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 возникала необходимость

в более корректных определениях и поиске источника ошибки, к которой могла привести нестрогая математика.

Вторым, что я узнал от Фрейзера, была проективная геометрия. Она произвела на меня сильнейшее впечатление своим математическим изяществом. Кроме того, методы проективной геометрии дают огромные возможности. 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 его изучения и вооружает нас методами, например методом однозначных 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, а знакомство с проективной геометрией еще больше воодушевило меня, и я остался верен ей на всю жизнь.

Вам может показаться, что проективная геометрия не слишком 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 новой области и еще не знает, что его ждет, ему 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 ему.

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 книгу [4]. 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, что уравнения классической электродинамики можно применять к атому. Я всегда считал атомы какими-то 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 на ядро, 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 книга показалась мне довольно трудной, но в конце концов я справился с ней. Я был очень рад, что Эддингтон находился 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 главным специалистом по теории относительности. Эйнштейн был не в счет просто потому, что он был далеко.

Другое 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-нибудь 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 обычным способом было бы очень нелегко.

Эти чаепития сыграли огромную роль в формировании моего интереса к математической красоте. Оказалось, что самое важное — 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 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 году Фаулер пробыл в Копенгагене три месяца, т. е. всю зиму.

Мне также посчастливилось побывать в Кавендишской лаборатории. Я слушал там рассказы экспериментаторов об их работе. Слышал 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 этой 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 часа два 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. Не могу ничего об этом сказать. 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 и жил. Время от времени происходило что-нибудь интересное. Однажды всех очень взволновало сообщение о теории Бора — Крамерса — Слэтера [7]. Эта теория представляла собой новый, с моей точки зрения, очень разумный подход. Поскольку одним из ее авторов был Бор, мне казалось, что новая теория стоит того, чтобы ею заниматься. Правда, она означала отказ от сохранения энергии в отдельных 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 в виде непрерывных волн, а поглощалось мгновенно в виде квантов. Такая картина, никому раньше не приходившая в голову, согласовывалась со всеми известными в то время экспериментальными фактами. Но теория Бора — Крамерса — Слэтера принесла нам удовлетворение ненадолго, потому что через год в точном эксперименте по рассеянию рентгеновского излучения электронами Гейгер и Боте показали [8], что энергия сохраняется в каждом отдельном событии. Таким образом, интерес к новой теории оказался преходящим и бесследно исчез.

Замечу, что идею Бора — Крамерса — Слэтера в 1936 году возродил Шенкланд [9]. Он поставил опыт, похожий на опыт Гейгера — Боте, но только вместо рентгеновского использовал γ -излучение и объявил, что в этом случае не было сохранения энергии в отдельном событии.

Я тогда очень уважал экспериментаторов, и когда они с уверенностью что-нибудь утверждали, я им верил и потому легко принял точку зрения Шенкланда. Я размышлял о том, почему закон сохранения энергии нарушается в случае высоких энергий, несмотря на справедливость его при низких энергиях: интерес мой был столь велик, что я даже послал маленькую заметку в журнал «Nature» [10]. Однако через год Шенкланд 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 в то время был де Бройль. Он выдвинул теорию [11], 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 буквально — электроны были реально существующими частицами, а волны де Бройля представлялись мне просто математической выдумкой, совершенно несущественной для физиков.

Моя точка зрения была, конечно, абсолютно неправильной. Работу де Бройля прочитал Шрёдингер. У Шрёдингера был иной подход, и он получил другое образование. Он хорошо изучил собственные функции и собственные векторы, о которых я не знал совсем ничего. Поэтому Шрёдингер, имеющий другой взгляд на мир, сумел развить идеи де Бройля и получить блестящий результат. Прimitивные формулы де Бройля, которые годились только для описания свободных частиц, Шрёдингер 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]. Тогда я 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 было приложение, посвященное гамильтоновой динамике и ее применениям в квантовой теории. Я очень тщательно изучил по этому приложению теорию Гамильтона, прочитал другие книги на ту же тему: кроме того, проштудировал теорию преобразований, связанную с гамильтоновой динамикой, и познакомился с заложенными в ней общими идеями.

Студенты в Кембридже часто собирались, чтобы обсудить научные проблемы. Одним из 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. 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 делал 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. Однако посещения заседаний Клуба Капицы себя оправдало.

Летом 1925 года 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 понимать. Гейзенберг говорил о возникновении своих идей о новой механике. Но я совершенно не осознавал, что Гейзенберг в этот момент вводит нечто 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 статьи [13], посвященной новой механике, а Фаулер передал ее мне с пометкой: «Что вы об этом думаете?»

Корректуру передали мне то ли в конце августа, то ли в начале сентября (не совсем уверен в дате), и я ее, конечно, прочел. Сначала она произвела на меня странное впечатление, 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 Гейзенберга, изучил ее более внимательно и неожиданно понял, что она дает ключ к решению всех проблем, с которыми мы тогда сталкивались.

Моя предыдущая работа была целиком связана с исследованием индивидуальных состояний. Если вам интересны те ложные пути, которые я выбирал в своей работе, то вот один из них: 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: 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 пред-

метом всеобщего любопытства. Кроме того, существовала квантовая механика, над проблемами которой я немало размышлял, правда, без особенного успеха. Я был так погружен в изучение боровских орбит, 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 сказал этого достаточно ясно. Теория выглядела как задача, доступная всем: обнаружив нерелятивистскую формулу, имеющую какой-нибудь физический смысл, надо переписать ее так, чтобы она согласовывалась 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 года, когда мне представился случай прочитать первую работу Гейзенберга. Как вы уже вчера слышали, вначале моя реакция была отрицательной. 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 Гейзенберга, 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 разности двух соответствующих значений энергии, деленной 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 надуманный случай при релятивистском подходе 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 принялся за дело, но существенно продвинуться мне не удавалось. 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 рассеянию [14]. 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, деленной на скорость света.

Теорией Гейзенберга я начал заниматься в Бристоле, приехав домой на остаток летних каникул. Вернувшись в начале октября 1925 года в Кембридж, я начал вести 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 приступить 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 умножить u на v , или vu , если умножить 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 непривычен 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 Гейзенберга 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 Гейзенберга.

В одно из октябрьских воскресений 1925 года, когда, несмотря на твердое желание отдохнуть на прогулке, я усиленно размышлял

над разностью $uv-vu$, мне пришла в голову мысль о скобке Пуассона. Мне вспомнилось, что в продвинутых курсах динамики я кое-что читал о таких странных величинах, как скобка Пуассона, и мне показалось, что существует тесная аналогия между скобкой Пуассона для 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 скобка Пуассона, и не знал для нее точной формулы. В моей голове были лишь смутные воспоминания. Но скобка Пуассона таила 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 знания о скобке Пуассона, найдя хотя бы ее определение.

За городом это было невозможно, поэтому мне оставалось поспешить домой и поискать что-нибудь о скобке Пуассона. Я просмотрел свои записи, те, которые я делал на разных лекциях, но там не нашлось ни одного упоминания о скобке Пуассона. Имевшиеся у меня учебники были слишком элементарны и не содержали таких сведений. Больше я 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» Уиттекера [15] скобку Пуассона, обнаружил, что это как раз то, что мне нужно. Она была абсолютно аналогична коммутатору. Точная формула для скобки 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 притом, 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 существовала еще одна скобка — скобка Лагранжа. В общем виде скобка Лагранжа очень похожа на скобку Пуассона, но имеет, конечно, совершенно другой смысл. Ситуация сложилась так, что люди, занимающиеся квантовой теорией, придают большое значение скобке Пуассона, а скобку Лагранжа вообще не считают существенной.

Мысль о том, чтобы связать скобку 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 числовой 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 позволяет 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 времени 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 скобку Пуассона, и попытаемся найти процедуру дифференцирования, подходящую для квантовых переменных.

Предположим, 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,

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

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

Теперь наложим требование, чтобы произведение xy дифференцировалось по закону

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

где y — другая квантовая переменная, представленная в виде матрицы.

Мы видим, что для выполнения этого требования необходимо, чтобы производная dx/dv имела вид

$$dx/dv = xa - ax. \quad (6)$$

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 скобку 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 сделал исключение. Не хотелось, чтобы главной предпосылкой работы стало случайно явившееся мне соотношение между коммутатором и скобкой 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 (5). Исходя из этого, выводится формула (6) и находится ее связь со скобкой Пуассона.

Когда статья была написана, Фаулер представил ее в Королевское общество. Там мою работу сочли важной, и она была опубликована [16] очень быстро, гораздо быстрее обычного.

Я послал копию Гейзенбергу и мгновенно получил ответ. Мне бы хотелось рассказать об этом и о некоторых других письмах Гейзенберга, 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, поскольку из нее видно, что на самом деле Гейзенберг был не очень уверен в своей теории, 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 $\nu = \partial H / \partial J$ в классической теории», — речь идет о связи между частотой и энергией в классической гамильтоновой теории.

Далее Гейзенберг продолжает: «Надеюсь, Вас не огорчит тот факт, что часть Ваших результатов уже была получена некоторое

*) Гейзенберг — Дираку, 20 ноября 1925 г., 2 с., по-немецки.

время назад в нашем институте. Сейчас они публикуются независимо в двух статьях: одна написана Борном и Йорданом [17], а другая Борном, Йорданом и мной [18]. В своих результатах Вы продвинулись значительно дальше, это особенно касается общего определения дифференцирования и связи квантовых условий со скобкой 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:

$$2\pi m(\dot{q}\ddot{q} - \ddot{q}\dot{q}) = i\hbar. \quad (7)$$

Приравнивая $i\hbar$ постоянную часть левой стороны уравнения (7), получаем квантовое условие Гейзенберга. Но я писал в своей статье, что если приравнять нулю оставшуюся часть левой стороны 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. Подразумеваются 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 заключает: «Затем можно вывести дисперсионную формулу Крамерса», — несмотря на то, что все называют ее дисперсионной формулой Крамерса — Гейзенберга.

В конце Гейзенберг сообщает: «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.

Тон его письма был очень доброжелательным: он не хотел, чтобы я огорчился из-за того, что другие люди, которые одновременно со мной работали над теми же задачами, в какой-то степени предвос-

хитили мои результаты. 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 Йорданом, и у нас возникли некоторые вопросы, которые мне бы хотелось выяснить. Я считаю, что самый важный Ваш результат заключается в общей формуле дифференцирования [см. формулу (6).— П. Д.]. 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).— П. Д.). На первый взгляд кажется, что те же самые рассуждения можно применить к обычным функциям. Тогда мы получили бы

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

что вообще-то неверно. Это вовсе не возражение, но следовало бы 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 механику, практически аналогичную классической, с доказательством закона сохранения энергии и условия, 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 $x=e^{av}$. 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 года, 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, они и сейчас лежат среди секретных папок Американской комиссии по атомной энергии, но на сегодняшний день мы должны считать их пропавшими. Может быть, их кто-нибудь в будущем «раскопает» и историки науки смогут их получить. Но пока, не имея этих писем, я могу лишь фантазировать по поводу своих ответов. Поскольку мои нынешние знания значительно шире, эти придуманные ответы могут, конечно, сильно отличаться от тех, что я писал на самом деле.

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

Третье письмо Гейзенберг отправил мне 1 декабря 1925 года. В нем 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, когда 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) и (5).— П. Д.], конечно же, выполняются, а вот ...[(4') — П. Д.] в первом случае дает $a(11, 11)=1/nv$, 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 одного стационарного состояния ведет к противоречию».

Второе замечание Гейзенберга было совершенно правильным. Я проявил небрежность, заявив, что энергия одинаковым образом зависит от J в классической и квантовой теории, а Гейзенберг справедливо указал мне на эту ошибку. Он сказал, что если бы мое утверждение оказалось верным, то это никого бы не обрадовало, 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 сочтите, пожалуйста, мои замечания критикой в адрес Вашей замечательной работы. Дело в том, что я должен написать для журнала "Mathematischen Annalen" статью о современном состоянии теории и не

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

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...». 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

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

Однако простое вычисление дает

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

Серьезная трудность, о которой говорит Гейзенберг, просто связана с тем, что скобки Пуассона, вычисленные в квантовой и классической теориях, 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 началось для меня знакомство с квантовой механикой. Надо сказать, что, работая над статьей, я всегда очень тщательно обдумывал систему обозначений. По моему мнению, 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 помешают дальнейшему развитию.

С проблемой обозначений я столкнулся в связи со скобкой Пуассона. Вся информация о ней я почерпнул из книги Уиттекера «Аналитическая динамика» [15], где для скобки Пуассона использовались круглые скобки, а квадратными скобками обозначалась скобка Лагранжа. В квантовой теории скобки Лагранжа вообще не нужны, в ней нужна только скобка Пуассона. Поэтому обозначения Уиттекера казались мне неудобными. Они наводят на мысль о скалярном произведении, известном из векторного анализа. Однако скалярное произведение симметрично относительно перестановки двух входящих в него членов, а скобка Пуассона антисимметрична относительно их перестановки. Поэтому я смело воспользовался другим обозначением скобки, отличным от обозначения Уиттекера. С тех пор так поступают все. Оказалось, что величину, антисиммет-

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

ричную 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 «перестановочность» казалось мне не совсем подходящим. Говоря о перестановках, обычно подразумевают, что меняется порядок расположения нескольких величин, а здесь 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 назвал c -числами. Буква q — это первая буква слова «quantum» (квантовый) или, может быть, слова «queer» (странный), а c может обозначать «classical» (классический) или «commuting» (коммутирующий). Затем я приступил к построению теории q -чисел; c -числа можно рассматривать просто как частный случай q -чисел, которые обладают тем свойством, что коммутируют с любыми величинами.

Я ничего не знал о происхождении q -чисел и считал, что гейзенберговские матрицы как раз и служат примером q -чисел, но могло оказаться, что q -числа имеют и более общий смысл. Все, что было известно о q -числах, сводилось к следующему: они подчиняются алгебре, в которой справедливы все обычные 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. Другую ошибку я сделал, предположив, что если произведение сомножителей A и B равно нулю, то один из сомножителей должен равняться нулю.

Я получил письмо от Бриллюэна, в котором он указал мне на ошибки. Письмо было датировано мартом 1926 года. 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 еще одно предположение. Оно заключалось в том, что для любой пары q -чисел u и v всегда можно найти такое q -число b , что $v = b u b^{-1}$. Исходя из этого, я сумел построить общую теорию функций от q -чисел, математически очень удачную. Однако мое предположение было, разумеется, неверным. Сейчас мы знаем, что оно может выполняться лишь в 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 Гейзенберга о том, что Паули удалось применить соображения квантовой механики к атому водорода, т. е. оказалось, что я конкурирую с Паули.

Следует заметить, что пока я занимался q -числами, появилась статья Ланцоша [19], 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 неправ, 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 несколько дней назад 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 водорода отделяет 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, то скоро мы научимся работать со всеми моделями атомов».

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

Упоминание о множителе 2 связано с только что возникшим тогда предположением, что электрон обладает спином. Эта идея принадлежала Гаудсмит и Уленбеку, которые с ее помощью сумели описать дублеты, наблюдаемые в спектрах щелочных элементов. Существование этих дублетов вполне объяснялось наличием у электрона спина, но значение дублетного расщепления в два раза превышало наблюдаемое. 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 покоится, в то время как его движение должно учитываться.

Далее Гейзенберг продолжал: «На самом деле, я пишу Вам, чтобы задать несколько вопросов. Несколько недель назад в журнале "Annalen der Physik" (см. [20].— Пер.) появилась статья Шрёдингера, написанная, как мне кажется, в духе квантовой механики. Не думали 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.

Дальше Гейзенберг соглашался 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 эффектом Комптона. «В Копенгагене широко обсуждают эту задачу и очень ею интересуются», — писал Гейзенберг.

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

Следует заметить, что я продолжал работать над теорией q -чисел и нашел способ сделать ее в какой-то степени релятивистской, исходя из первоначальных идей, появившихся у меня при чтении письма Гейзенберга в сентябре 1925 года.

В марте 1926 года в Кембридж приехал Зоммерфельд, и мне удалось с ним встретиться. Эддингтон 13 марта 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 эффекта Комптона, я ее вскоре 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 года. В Лондоне тогда происходила забастовка, и всех желающих приглашали в службу сервиса: водить поезда, автобусы или еще что-нибудь делать для поддержания работы разных служб. Многие мои приятели и студенты откликнулись на этот призыв и бросили учиться, но я был слишком поглощен диссертацией и как будто прилип к ней. К июню 1926 года моя диссертация была закончена.

III

Итак, весной 1926 года я написал докторскую диссертацию [21]. Я упорно продолжал над ней работать, не обращая внимания на забастовку, которая происходила в это время в Англии и нарушала деятельность многих людей. В диссертации я все же сделал несколько ошибок в общем описании q -чисел. Кроме того, в ней упоминалась теория Шрёдингера. Я уже упоминал, 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 этого письма мои представления о теории Шрёдингера, конечно, совершенно изменились. Может быть, не сразу, но через некоторое время я с энтузиазмом взялся за теорию Шрёдингера и узнал о ней все что мог. Мне нужно было изучить новый аппа-

рат — аппарат собственных значений и собственных векторов. Шрёдингер узнал эту технику еще в самом начале своего обучения, но в Кембридже она была известна очень плохо.

Овладев новым аппаратом, я задумался над тем, как его использовать, и пришел к задаче об атомной системе, состоящей из многих одинаковых частиц. Я подумал, что может существовать волновая функция, симметричная или, наоборот, антисимметричная относительно всех входящих в систему частиц. Подобные 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 объясняла закон Планка.

Но были и антисимметричные 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 сообщил [22]. 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 у меня из 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 антисимметричных волновых функциях, у меня не осталось никаких воспоминаний о ней.

В результате я отправил Ферми письмо, полное извинений. Сознавая, что у Ферми были причины обидеться на меня, 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 упомянутой статистики, и ее часто связывают с нами обоими. Однако из опубликованных материалов очевидно, что первооткрывателем был Ферми, а я в своей более поздней работе показал, как новая статистика может быть согласована с квантовой механикой. Фактически, она сама является следствием квантовой механики, вытекающим из предположения, что волновые функции должны быть антисимметричными.

После защиты диссертации я уже больше не был привязан к Кембриджу, и мне захотелось попутешествовать. Больше всего меня, конечно, тянуло в Гёттинген, на родину квантовой механики. В Гёт-

тингене жил Гейзенберг, там были Борн и Иордан, активно участвовавшие в создании матричной механики. Но когда я заговорил на эту тему с Фаулером, 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 Гёттинген. Наконец, я принял решение разделить предназначенное для поездки время на две части и сначала съездить в Копенгаген.

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

У Бора была привычка думать вслух, вся его гигантская работа мысли происходила вслух, и ему требовались слушатели. Это мог быть и целый лекционный зал, 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 я ни старался, понять их до конца 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 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, коллоквиуме или каком-нибудь подобном мероприятии 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 большая часть слушателей ничего не знала. Тогда Эренфест также прерывал его и просил объяснить непонятное место.

И все опять были благодарны Эренфесту. Многие, наверное, нуждались в объяснении, но никто не рещался 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.

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 критикуют, 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 знать». 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 рассказывал, 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 мог бы воспринять как непосредственную критику и обидеться 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 открытиям в квантовой теории, но мне кажется, что ни одной по-настоящему глубокой работы он не сделал.

Коль скоро я взялся оценивать 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. Обнаружилось, 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 была символом веры математическая красота всех уравнений, описывающих фундаментальные законы Природы. 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 Бройля, 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, близко познакомившись с Шрёдингером, я узнал от него, в чем было дело. Он рассказал, что работал тогда в релятивистском подходе, навеянном работами де Бройля, и, вводя электромагнитные потенциалы, пришел к релятивистскому волновому уравнению, которое оказалось обобщением уравнения де Бройля. Первый его порыв был посмотреть, что получится, если с помощью этого уравнения рассчитать уровни атома 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 придут в согласие 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 опубликовать 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 аппа-

рата и не имела непосредственного физического применения. 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 самостоятельно, развивая собственные идеи: 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. Совершенно очевидно назрела необходимость 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 скобке Пуассона или 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. Напротив, 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, и преодолевать их следовало 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 получилась работа, которая легла в основу общей теории преобразований квантовой механики и вместе с тем продемонстрировала достоинства новой системы обозначений.

По поводу обозначений должен сказать, что мне приходилось придумывать символы, в которых должна явно содержаться информация о том, что именно важно выделить в явной форме, чтобы при этом оставались 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.

Мое пребывание в Копенгагене было очень плодотворным, потому что я развил тогда общие идеи физической интерпретации квантовой механики (работа, доставившая мне много удовольствия) и обратился к квантовой теории излучения. Я показал ее прямую связь со статистикой Бозе — Эйнштейна, эта связь становится

ясной при работе с волновыми функциями, симметричными относительно перестановки частиц.

В процессе работы мне пришла в голову одна из неизвестно откуда 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 числами, т. е. c -числами. Возникает вопрос, что будет, если превратить их в q -числа и предположить, что они не коммутируют с им сопряженными?»

В результате родилась 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 года, в Копенгаген приехал Паули. Я рассказал ему о своей работе по 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 переменные 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 статью [23], 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 включении спина 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 бесспиновой 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 следующее: Крамерс говорил мне (через несколько лет после появления моего уравнения), что он независимо получил уравнение второго порядка, которое было эквивалентно моему уравнению первого порядка. Возможно, Крамерс исходил из уравнения Паули. Он не опубликовал свою работу, потому что она перекрывалась моей.

В начале февраля 1927 года я выехал из Копенгагена в Гёттинген и проезжал через Гамбург. В это время там проходил 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 Гёттинген я ехал в вагоне четвертого класса вместе с другими физиками, возвращавшимися в Гёттинген с Гамбургского съезда. Среди них был Робертсон, с которым потом я сошелся довольно близко в Принстоне. Робертсон занимался космологией, и от него я почерпнул свой первый интерес к космологическим моделям Вселенной.

Прибыв в Гёттинген, я провел там несколько месяцев. Здесь царил более формальный дух, чем в Копенгагене, и поэтому в Гёттингене 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 пансионе и очень часто встречались.

Должен сказать, что, покинув Кембридж, я оставался верен своему обычному образу жизни, 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 взбадривала.

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

В Гёттингене я получил от Эренфеста приглашение посетить его Институт в Лейдене. Оппенгеймер тоже был приглашен, и в июне 1927 года мы вместе отправились в Лейден. Несколько дней мы провели у Эренфеста в его Институте и еще съездили на один день в Утрехт к Крамерсу.

В октябре 1927 года 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 происшедшего 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 конкретные 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 них 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 бозе-статистики это удастся, а для ферми-статистики такой картины нет. Однако важна их алгебраическая структура, ибо именно благодаря ей вторичное квантование для систем, подчиняющихся статистике Ферми, оказывается таким же важным, как для систем, подчиняющихся бозе-статистике.

На Сольвеевском конгрессе 1927 года 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 позволила интерпретировать квадрат модуля волновой функции как вероятность получения определенного результата в любом наблюдении над атомной системой. Следует заметить, что к тому же заключению в применении к теории рассеяния независимо пришел Бор. После появления 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 приходится сталкиваться в атомной теории. Бывают случаи, когда мы вынуждены признать, что Природа делает выбор, но не можем предсказать, каким он будет.

Помню случай, который произошел на Сольвеевском конгрессе 1927 года. Однажды перед началом лекции ко мне подошел Бор и

спросил: «Над чем Вы сейчас работаете?» Я ответил: «Пытаюсь построить релятивистскую теорию электрона». Бор тогда сказал: «Но ведь Клейн уже решил эту задачу». Я был несколько обескуражен и стал объяснять ему, 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? В моем распоряжении имелась общая физическая интерпретация 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 толку от теории нескольких частиц, если еще не существует теории одной частицы. Теорию нельзя считать логичной, если она не применима к одной частице. В то же время, рассматривая всего одну частицу, мы должны уметь вычислять для нее вероятности, причем вероятности должны получаться положительными, откуда следует, что в волновую функцию может 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 компонента σ_1 , σ_2 , σ_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 важен, несмотря на то, что он не дает 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 вы-

ражения. Но если бы речь шла о релятивистской теории 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 я не знал, как решить проблему.

Я долго изучал возникшую трудность, пока мне вдруг не пришло 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. Заменяв σ -матрицы матрицами из четырех рядов и четырех строк, можно с легкостью вычислить 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:

$$(\rho_0 - \alpha_1 p_1 - \alpha_2 p_2 - \alpha_3 p_3 - \alpha_4 mc) \psi = 0. \quad (16)$$

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 извлечь из него что-нибудь интересное, нужно было ввести электромагнитное поле. Существовала общая задача: 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 Комптона. 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 в начале нашего века, но я никогда не пытался 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 выражением $p + (e/c)A$, где A — электромагнитный потенциал.

Тут я заметил, что у меня получилось очень удачное уравнение. Из него автоматически следовало, что спин электрона равен $1/2$, в полном соответствии с требованиями эксперимента, и, кроме того, что электрон обладает магнитным моментом. С помощью этого урав-

нения я рассчитал в первом приближении уровни атома 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 высших 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 сделана, 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 они согласуются с опытом. Автор новой идеи всегда побаивается какого-нибудь новшества, которое может погубить его идею, а любой другой человек, свободный от таких страхов, способен более решительно продвигаться в новые области.

Существовавшее тогда волновое уравнение электрона было во многом вполне удовлетворительно, но обладало одним серьезным недостатком: внутреннее движение электрона описывалось матрицами, построенными из четырех строк и столбцов, а для описания двух спиновых состояний электрона, которые наблюдаются экспериментально, требуются матрицы, состоящие всего из двух строк и столбцов. В результате этого волновое уравнение давало в два раза больше состояний, чем необходимо для описания экспериментальной ситуации. Пристальное изучение показало, что половина состояний соответствует отрицательным значениям энергии. Надо было просто исключить эти ненаблюдаемые состояния с отрицательными энергиями и ограничиться состояниями с положительными энергиями. Тогда получилась бы теория, в которой все величины можно наблюдать 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 надо учитывать.

Они возникают сравнительно редко, когда в спектре излучения отсутствуют ультрафиолетовые частоты, и если пренебречь этими переходами, то можно построить приближенную теорию. Какое-то время именно так и приходилось поступать.

Шрёдингер предложил модифицировать теорию, исключив переходы между состояниями с положительной и отрицательной энергией. Однако для этого пришлось видоизменить волновое уравнение, в результате чего был испорчен его релятивистский характер и исчезла его красота. Так что такой путь нельзя считать удовлетворительным.

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, поскольку 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, пришлось рассматривать возможность того, что некоторые из состояний с отрицательной энергией окажутся свободными. Возникнут дырки, которые ведут себя как частицы, но уже с положительной энергией.

Прийти к этой идее было несложно: было совершенно ясно, что нужно получить, и существовала очень близкая аналогия с теорией химической валентности. Все газы образуют заполненные 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 энергиями, 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 все были абсолютно уверены, 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 был бы полезен нейтрон для экспериментаторов в качестве идеального снаряда для стрельбы по атомным ядрам: полет нейтрона не возмущался бы внешними электронами. Но никто не верил в реальность нейтрона. Всем казалось очевидным, что поскольку есть два сорта электрических зарядов, должно быть и два сорта частиц для их 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 я в своей достаточно примитивной теории

пренебрегал кулоновскими силами, действующими между электронами. Как именно следует вводить эти силы в теорию, я не знал, но мне казалось, что они каким-то образом 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 эту 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. 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, по которым дырки нельзя было наблюдать. Он не мог назвать эти особые причины, а сказал о них как о чем-то, что необходимо объяснить в будущем. Оппенгеймер был очень близок к истине. Дырки эти были частицами той же массы, 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 и Кавендишской лаборатории, был такой случай (не помню точно — случился это в 1926 или в 1927 году): 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 частицы эти — 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 кто-то это сделал, то пришел 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 придают достаточного значения тому, что выглядит как курьез, не стоящий 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. Впервые ее наблюдал Блэкетт. Он получил снимок, но, будучи осторожным человеком, не хотел публиковать свой результат до его подтверждения. Андерсон оказался смелее и, получив такой же результат, опубликовал его [25],

заслужив славу первооткрывателя позитрона. Этим было положено начало открытию огромного числа 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 очевидным, что не может существовать никаких частиц, кроме электронов и протонов. Теперь физики имеют диаметрально противоположную точку зрения и при малейшем экспериментальном или теоретическом указании стремятся «постулировать» новую частицу. Число частиц, которые относятся к фундаментальным, сейчас увеличилось до нескольких сотен, вместо двух, которые были вначале.

Я подошел к концу рассказа о том времени, которое я назвал необычайной эпохой. Это было время быстрого развития теоретических идей, связанных с фундаментальными основами нашего понимания атома. С тех пор физика, разумеется, не прекращала своего развития, но оно шло совсем другими путями. Экспериментаторы все больше овладевают инициативой. Они ставят много экспериментов и сообщают о результатах наблюдений.

Положение теоретиков теперь не настолько 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 числа новых частиц.

Список литературы *)

1. *Holton G.* // History of Twentieth Century Physics: Proceedings of the International School of Physics «Enrico Fermi». Course LVII.— New York; London: Academic Press, 1977.— P. 266.
2. *Милль Дж.* Система логики силлогистической и индуктивной.— 2-е изд., вновь обработ.— М.: Г. А. Леман, 1914.
3. *Hodge J.* // J. London Math. Soc.— 1959.— V. 34.— P. 111.
4. *Cunningham E.* Relativity, the Electron Theory and Gravitation.— 2nd ed.— London: Longmans, Green and Co., 1921.
5. *Eddington A. S.* The Mathematical Theory of Relativity.— Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1924 (перевод: Эддингтон А. С. Теория относительности: Пер. с англ.— Л.; М.: ОНТИ, 1934).
6. *Dirac P. A. M.* // Philos. Mag.— 1924.— V. 47.— P. 1158.
7. *Bohr N., Kramers H., Slater J.* // Ibid.— P. 785.
8. *Bothe W., Geiger H.* // Naturwissenschaften.— 1925.— Bd 13.— S. 440.
9. *Shankland R. S.* // Phys. Rev.— 1936.— V. 49.— P. 8.
10. *Dirac P. A. M.* // Nature.— 1936.— V. 137.— P. 298.
11. *De Broglie L.* // Compt. Rend. Acad. Sci.— 1923.— T. 177.— P. 507.
12. *Sommerfeld A.* Atomic Structure and Spectral Lines.— London: Methuen, 1923 (перевод: Зоммерфельд А. Строение атома и спектры: Пер. с англ.— М.; Л.: Госиздат, 1926).
13. *Heisenberg W.* // Z. Phys.— 1925.— Bd 33.— S. 879 (перевод: Успехи физ. наук.— 1977.— Т. 122.— С. 574).

*) Составлен переводчиком.— *Примеч. ред.*

14. Dirac P. A. M. // Proc. Roy. Soc. Ser. A.— 1926.— V. 11f.— P. 405.
15. Уиттекер Е. Т. Аналитическая динамика: Пер. с англ.— М.; Л.: ОНТИ, 1937.
16. Dirac P. A. M. // Proc. Roy. Soc. Ser. A.— 1925.— V. 109.— P. 642 (перевод: Успехи физ. наук.— 1977.— Т. 122.— С. 611—621).
17. Born M., Jordan P. // Z. Phys.— 1925.— Bd 34.— S. 858.
18. Born M., Heisenberg W., Jordan P. // Ibid.— 1926.— Bd 35.— S. 557.
19. Lanczos K. // Ibid.— S. 812.
20. Schrödinger E. // Ann. Phys.— 1926.— Bd 79.— S. 301.
21. Dirac P. A. M. Quantum Mechanics: Dissertation.— Cambridge University, May 1926.
22. Fermi E. // Z. Phys.— 1926.— Bd 36.— S. 902.
23. Pauli W. // Ibid.— 1927.— Bd 43.— S. 601.
24. Sommerfeld A. Atombau und Spectrallinien II (перевод: Зоммерфельд А. Строение атома и спектры: Пер. с нем.— Т. 1—2.— М.: Гостехиздат, 1956.
25. Anderson C. D. // Science.— 1932.— V. 76.— P. 238.