

Первые шаги квантовой механики в Геттингене^{*7}

Полвека назад в Геттингене возникла квантовая механика, и этот ее юбилей служит хорошим поводом рассказать о начале ее истории здесь, в Геттингене, в традициях старого коллоквиума. Я не могу и не хочу брать на себя роль историка, пытающегося после основательного изучения источников очертить по возможности корректный, объективный образ отдельных событий; существуют очень хорошие исторические очерки, и я не мог бы создать лучший. Мне хотелось бы вместо этого набросать субъективную картину, воссоздать частности, не вошедшие в исторические исследования, и сказать, какие шаги мне лично казались наиболее важными, хотя с объективной точки зрения об их значении следовало бы судить, возможно, иначе. Однако, прежде чем приступить к делу, я должен, пожалуй, сказать еще пару слов о географическом положении Геттингена в ландшафте тогдашней физики, и особенно — тогдашней атомной физики. Квантовая теория Планка была в ту эпоху, собственно, вовсе не теорией, а занозой в ученых умах. В плотно сбитое строение классической физики она внесла идеи, во многих отношениях чреватые трудностями и противоречиями, а потому не много было университетов, где желали всерьез заниматься этой проблематикой. Теория Бора изучалась и развивалась, помимо Копенгагена, преимущественно Зоммерфельдом в Мюнхене, и геттингенцы окончательно решились разрабатывать это научное направление только в 1920 году, когда пригласили к себе Франка и Борна. Сравнивая три центра, в которых впоследствии преимущественно развивалась теоретическая физика, — Копенгаген, Мюнхен и Геттинген, — мы можем связать их с тремя направлениями в ее работе, которые еще и сегодня могут быть отчетливо разграничены между собой: фено-

* © Die Anfänge der Quantenmechanik in Göttingen. R. Piper und Co., Verlag, München 1977.

менологическое направление стремится привести в осмысленную связь новые данные наблюдений, представить их взаимосвязь в математических формулах, которые казались бы более или менее приемлемыми в свете общепринятой физики; математическое направление трудится над описанием природных процессов посредством тщательно проработанного математического формализма, по возможности отвечающего требованиям чистой математики с ее строгостью; третье направление, которое можно назвать концептуальным, или философским, заботится прежде всего о прояснении понятий, позволяющих в конечном счете описывать природные процессы. Можно задним числом отнести зоммерфельдовскую школу в Мюнхене к феноменологическому методу, геттингенский центр — к математическому, а копенгагенский — к философскому направлениям, хотя границы между ними, естественно, расплывчаты. Мое сообщение по необходимости делится на три временных отрезка — подготовительные 1922—1924 годы, рецидивирующий 1925 год и годы разработки — 1926-й и 1927-й.

Если говорить о первых шагах квантовой механики в Геттингене, то начинать надо, несомненно, с «фестиваля Бора» летом 1922 года. По инициативе Гильберта и физиков Франка, Борна и Поля университет пригласил датчанина Нильса Бора прочесть серию обобщающих лекций о своей теории. Были приглашены гости из других городов, в том числе Зоммерфельд из Мюнхена, и все мероприятие, одно из первых подобного рода после супервой разрухи послевоенных лет, носило на себе печать бодрящего нового начинания, служившего как налаживанию международных научных связей, так и решению задач только что возникавшей атомной физики. Вдобавок Геттинген при великолепнейшей погоде того лета сиял садами и цветами, а настроение и волнение академической молодежи, заполнившей большую часть аудитории, несмотря на трудную тематику, придавало докладам такую праздничность, что выражение «фестиваль Бора» сразу вошло в обиход — по образцу «фестиваля Генделя», как раз тогда начавшегося в Геттингенском городском театре. Зоммерфельд захватил меня с собою из Мюнхена; он дружески финансировал мою поездку, которая далеко выходила за мои тогдашние возможности, и я в полной мере наслаждался праздничными днями, хотя нередко и на пустой желудок, что для студента четвертого семестра было в те годы нормой.

Бор со всей подробностью развернул в серии лекций свою теорию, и мой интерес, как и многих других слушателей, привлекли с самого начала главным образом два круга проблем: во-первых, вопрос, можно ли в самом деле более или менее правильно определить энергию дискретных стационарных состояний, прилагая к механическим движениям электронов в атоме квантовые условия Бора—Зоммерфельда; во-вторых, вопрос о степени соответствия между боровской моделью атома со многими электронами, с одной стороны, и химическими и спектральными характеристиками элементов периодической системы — с другой.

Что касается первого круга проблем, то, как мне показалось, из формулировок Бора очень скоро стало ясно, что он не так твердо верил в применимость классической механики к движениям электронов внутри атома, как, скажем, Зоммерфельд. Тот факт, что при допущении этого движения частоты предполагаемого обращения электронов вокруг ядра никак не соответствовали частотам испускаемого атомом излучения, сам Бор воспринимал как почти невыносимое противоречие, которое он кое-как пытался преодолеть с помощью своего принципа соответствия. Спорный вопрос, с которым я в этой связи обратился к Бору, повлек за собой долгую беседу во время прогулки к вершине Хайнберга; тогда я впервые понял, сколь трудными, даже почти безнадежными представлялись ему в то время эти проблемы атомной динамики. Бор подчеркивал снова и снова, что человеческий язык явно недостаточен для описания внутриатомных процессов, коль скоро речь идет об области опыта, совершенно лишенней непосредственной наглядности; поскольку же всякое понимание и всякое общение между физиками опирается на язык, никакое решение здесь пока вообще немыслимо. Правда, Бор тогда еще думал, что затруднения коренятся прежде всего в теории излучения, т. е. в электродинамике, тогда как я, наоборот, выводил из нашей дискуссии все больше доводов в пользу того, что на роль козла отпущения как будто бы претендует механика или даже, пожалуй, прямо кинематика. О втором круге проблем — квантовании многоэлектронной системы и периодической системе элементов — мы в те дни говорили очень мало. Бор подтвердил мне, что, как мы с Паули уже давно догадывались в Мюнхене, он вывел свои сложные атомные модели не по законам классической механики, и что они скорее интуитивно, на основании его опыта возникли у

него в качестве наглядных образов, насколько вообще механические образы пригодны для представления атомных процессов.

Лекции Бора послужили решающим стимулом для дальнейшего развития атомной физики в Геттингене. Поскольку в зимний семестр 1922/23 учебного года я учился в Геттингене — Зоммерфельд уехал на это время в Америку, — события развертывались с самого начала у меня на глазах. Борн организовал семинар по проблемам теории Бора. Поскольку, как мне помнится, в нем приняло участие едва ли больше восьми физиков и математиков, семинар часто собирался вечерами в доме Борна. Госпожа Борн пирожками или фруктами подкрепляла силы участников. Их точный список я сейчас уже не смог бы привести, в него определенно входили Йордан, Хунд, Ферми, Паули, Нортхайм и математик Карекьярто, может быть не все одновременно; впрочем, и тут я лучше представил бы восстановление частных подробностей историку. Задания, которые давал нам в рамках этого семинара Борн, относились исключительно к области механики, и уже отсюда становилось ясно, что Борн тоже видел подлинный камень преткновения в механике и лишь во вторую очередь — в электродинамике или в теории излучения. Мне досталась в этой связи задача разобраться в теории возмущений из классической астрономии; ибо всем, кто работал в нашей области, уже тогда было ясно, что заниматься расчетом простого случая атома водорода с его единственным электроном недостаточно. Правила Бора—Зоммерфельда были с успехом приложимы к водороду даже при наличии возмущения в виде внешнего электромагнитного поля; но при разборе систем со многими электронами возникали непреодолимые трудности. От геттингенских математиков мы знали о головоломной трудности задачи трех тел в астрономии. Периодические и непериодические решения располагаются там в сколь угодно тесном соседстве. А квантовые условия опирались исключительно на допущение периодических решений. Мы углубились поэтому прежде всего в общую теорию возмущений механики Гамильтона—Якоби, как она применяется астрономами. Потом перешли к изучению резонансных эффектов между различными планетными орбитами одной и той же системы; мне однажды пришлось выступить с рефератом о так называемом методе Болина⁸. Главная польза этих усилий заключалась в осознании того, что, хотя классическая механика заведомо неверна,

она содержит многие черты, обнаруживающиеся в эмпирических закономерностях квантовой теории, и что боровский принцип соответствия образует в некотором смысле мост между этими двумя столь различными представлениями. Так что если в Мюнхене точный расчет отдельных атомных состояний считали важнейшим достижением квантовой теории, а в принципе соответствия видели малоудовлетворительную «затычку» на худой конец, то в геттингенских дискуссиях принцип соответствия все определенное выдвигался на центральное место. К тому же в феноменологических работах мюнхенской школы по аномальному эффекту Зеемана и по определению расстояния между спектральными линиями и интенсивностей в мультиплетах снова и снова всплывали формулы, очень похожие на те, которые можно было вывести из классической механики. Например, в таких формулах часто встречался квадрат орбитального момента. Однако если квантовое число орбитального момента системы принять за I , то его квадрат эмпирически оказывался равным не I^2 , а $I(I+1)$; в одной работе об эффекте Зеемана я охарактеризовал корень из этого последнего выражения как орбитальный импульс. Это дало повод Зоммерфельду, придававшему принципиальную важность целочисленным решениям, назвать введенную мною величину «размытым I ». Мало-помалу в ходе геттингенских дискуссий укоренялось ощущение, что классические формулы всегда лишь наполовину верны — однако все-таки наполовину они *верны* — и что при известной сноровке по ним можно угадать верные квантовотеоретические формулы.

Естественно, тут же, в Геттингене, продолжалась работа и над другими темами, выдвинутыми «фестивалем Бора» и касавшимися многоэлектронной системы и периодической системы элементов. Вспоминаю, что этому были посвящены главным образом дискуссии между Бором и Хундом, в то время как я, хотя и занимался еще с мюнхенских времен аномальным эффектом Зеемана и мультиплетами, уделял больше внимания существенным вопросам принципа соответствия. Другой важный стимул в том же направлении исходил из работ Ладенбурга и Крамерса по дисперсионной теории. Здесь Фурье-компоненты, описывающие движение в классической механике, были поставлены в связь с эйнштейновскими вероятностями перехода при рассеянии света. Принцип соответствия был тем самым конкретно проинтерпретирован через соотношения, взятые из классической теории дисперсии, так что опять

можно было признать классическую механику наполовину верной.

Тогдашнее состояние дискуссий очень точно изображено в летней (1924 года) работе Борна под заглавием «О квантовой механике». Здесь, таким образом, впервые был употреблен термин «квантовая механика», и я должен, пожалуй, воспроизвести резюме, стоявшее в начале работы Борна. Оно гласило: «В работе содержится попытка сделать первый шаг к квантовой механике внутриатомной связи; для важнейших свойств атома — стабильности, резонанса на дискретных частотах, принципа соответствия — предлагаются объяснения, естественным образом вытекающие из законов классической физики. Теория включает дисперсионную формулу Крамерса и обнаруживает тем самым близкое родство с полученной в Мюнхене [Гейзенбергом] формулой правил аномального эффекта Зеемана»⁹. Как явствует из деталей работы, Борн имел совершенно отчетливое ощущение, что квантовая механика отличается от классической механики тем, что на место дифференциальных уравнений классической теории в квантовой теории должны выступить разностные уравнения. Он дал мне поэтому задание изучить теорию разностных уравнений, уже подробно разработанную математиками. Я выполнил задание с немалым эстетическим наслаждением, но также и с чувством, что физические проблемы никогда нельзя разрешить, исходя из чистой математики. Реальная преграда, о которой мы тогда догадывались, но которую еще не понимали, заключалась в том, что мы все еще продолжали говорить об орбитах электронов и не имели тут, собственно, никакой альтернативы; ведь была же видна траектория электрона в камере Вильсона, так, стало быть, и внутри атома должны были существовать орбиты электронов.

Прежде чем перейти теперь к событиям 1925 года, я хотел бы рассказать две небольшие истории, показывающие, как напряженно мы занимались тогда проблематикой квантовой теории. Группа молодых людей, учившихся у Борна и Франка, вообще не могла говорить ни о чем другом, кроме теории квантов, — до того мы были захвачены ее успехами и внутренними противоречиями. Мы брали тогда скромные обеды в одном частном заведении напротив аудиторного корпуса. Однажды, к моему изумлению, хозяйка попросила меня после обеда для частного разговора в свою комнату. Она объявила мне, что мы, физики, к сожалению, не сможем впредь обедать у нее,

потому что вечные профессиональные глупости за нашим столом до того надоели другим людям за другими столами, что она потеряет остальных клиентов, если не расстанется с нами. В другой раз мы вместе отправились на лыжную прогулку в Гард, кажется, мы хотели подняться на Брокен, и на обратном пути в Андреасберг один из группы, по-моему Ханле, пропал. Мы искали и не могли найти его и уже боялись, как бы он не повредил себе ногу или не заблудился в лесу. Вдруг из порядком отдаленного лесочка мы услышали довольно-таки жалобный крик «*hv!*» (аш ню), и поняли, куда перенести свои поиски.

Но теперь вернемся к событиям 1925 года. В зимний семестр 1924/25 учебного года я снова работал в Копенгагене, пытаясь построить вместе с Крамерсом теорию дисперсии. По ходу работы в формулах, описывающих эффект Рамана, появились определенные математические выражения, которые в классической теории были произведениями рядов Фурье, тогда как в квантовой теории они явно подлежали замене аналогично построеными произведениями рядов, относящихся к квантовотеоретическим амплитудам линий спектра испускания или поглощения. Закон умножения для этих рядов имел простой и убедительный вид. Когда в летний семестр 1925 учебного года я возобновил эту работу в Геттингене, одно из первых же обсуждений с Борном привело нас к выводу, что я должен попытаться угадать амплитуды и интенсивности для водорода, исходя из формул классической теории с учетом боровского принципа соответствия. Этот метод угадывания уже успел хорошо зарекомендовать себя. Нам казалось, что мы достаточно усвоили его в прошлых работах. Однако при более углубленном подходе задача оказалась чересчур сложной, по крайней мере для моих математических способностей, и я искал более простые механические системы, где метод угадывания обещал больший успех. При этом у меня возникло ощущение, что я должен отказаться от какого бы то ни было описания орбит электронов, должен даже сознательно изгонять подобные представления. Вместо этого мне хотелось целиком положиться на полуэмпирические правила умножения амплитудных рядов, которые оправдали себя в теории дисперсии. Искомой механической системой я избрал одномерный ангармонический осциллятор, который казался мне достаточно простой и вместе с тем не слишком тривиальной моделью.

Примерно в то же время, в конце мая или в начале июня, мне пришлось попросить у Борна двухнедельный отпуск, поскольку я заболел очень неприятной формой сенной лихорадки и хотел дождаться выздоровления на уединенном острове Гельголанд вдали от цветущих лугов. Там я смог без всяких внешних помех уйти с головой в свою проблему. Я заменил пространственные координаты таблицей амплитуд, которая предположительно должна была соответствовать классическому ряду Фурье, и написал для нее классическое уравнение движения, причем в нелинейном члене, выражавшем ангармоничность, применил умножение амплитудных рядов, оправдавшее себя в дисперсионной теории. Лишь гораздо позднее я узнал от Борна, что речь тут шла просто о матричном умножении — разделе математики, остававшемся мне до того времени неизвестным. Меня беспокоило то, что при такого рода умножении рядов $a \times b$ не обязательно оказывалось равным $b \times a$. При таком уравнении движения таблицы, выражавшие пространственное местоположение, не достигали еще однозначной определенности. Предстояло еще найти замену для квантового условия Бора—Зоммерфельда, ибо в нем применялось понятие электронных орбит, которое я намеренно сделал для себя запретным. Но отвечающее принципу соответствия преобразование вскоре привело меня к известному мне по Копенгагену правилу сумм, которое Томас и Кун вывели из дисперсионной теории¹⁰. Тем самым вроде бы вся математическая схема обретала законченный вид, и теперь оставалось исследовать, поддается ли она механической интерпретации. Для этого требовалось показать, что существует выражение для энергии, которое можно представить через таблицы координат и которое по принципу соответствия связано с классической формулой энергии; что это выражение постоянно во времени, то есть что закон сохранения энергии не нарушается; и что соответственно таблицы, выражющие энергию, представляют собою то, что мы сегодня называем диагональной матрицей. Наконец, предстояло доказать, что разности энергетических уровней различных атомных состояний с точностью до множителя \hbar , то есть постоянной Планка, соответствуют частоте излучения, испускаемого при переходах. Таким образом, надо было удовлетворить сразу многим условиям; расчеты были элементарными, но именно поэтому довольно громоздкими. В конце концов оказалось, что все условия удовлетворены, что можно тем самым уверенно говорить о создании

основ квантовой механики. По возвращении в Геттинген я показал работу Борну, который нашел ее интересной, но несколько странной; странной потому, что понятие электронных орбит было полностью элиминировано. Он все равно послал ее для публикации в физический журнал. Борн и Йордан углубились в математические выводы из работы, на этот раз без меня, потому что Эренфест и Фаулер пригласили меня прочесть доклады в Голландии и в английском Кембридже. Буквально за несколько дней Борн и Йордан отыскали решающее соотношение $pq - qp = 2\pi i/h$, благодаря которому вся математическая схема стала сразу прозрачной; теперь можно было легко и изящно выводить такие важные законы, как закон сохранения энергии¹¹.

К моему возвращению из Англии в сентябре в Копенгаген уже была, как мне помнится, написана работа Борна—Йордана, содержащая убедительное математическое обоснование квантовой механики. Немного позднее, кажется где-то в конце октября, когда я снова был в Геттингене, я получил от Дирака из Кембриджа письмо, где он сообщал мне свою форму квантовой механики, построенную на основе моих кембриджских сообщений. Он не применял матричного исчисления, а вводил для динамических переменных p и q особую алгебру, в которой решающую роль играли, естественно, перестановочные отношения¹². Сразу было видно, что формулировка Дирака эквивалентна методу Борна—Йордана. Мы могли уже считать, что стоим со своей новой механикой на сравнительно надежном математическом основании, и решили втроем, то есть Борн, Йордан и я, написать подробную работу, в которой мы должны были рассмотреть системы со многими степенями свободы, теорию квантовомеханических возмущений и связь всего этого с теорией излучения. В этой работе нам в полной мере пригодилась математическая традиция Геттингенского университета. Борн был не только прекрасно знаком с математической теорией матриц, он знал также Гильбертову теорию интегральных уравнений и квадратичных форм бесконечного числа переменных. Он смог соответственно показать, что анализ квантовомеханической системы сводится к преобразованию бесконечных квадратичных форм относительно главной оси. Отсюда можно было легко вывести и теорию возмущений. Проведенные Йорданом расчеты явлений пульсации ясно показали прерывный характер квантовых переходов.

Но при написании работы были и трудности, упоминаяемые Борном в своих мемуарах. Для меня было очень важно выдвинуть на передний план физическое содержание теории, особенно отсутствие электронных орбит в атоме, тогда как Борн считал сердцевиной теории преобразования относительно главных осей, определенный математический формализм. Было еще и впешнее затруднение в том, что в конце октября Борн уезжал в Америку; для совместных обсуждений в Геттингене оставалось поэтому лишь несколько дней, и нам с Йорданом пришлось закончить работу уже после отъезда Борна. Как видите, уже и тогда заграничные поездки, доклады и конгрессы мешали научному прогрессу, хотя, конечно, еще не в такой чудовищной мере, как сегодня. «Работа трех», как мы ее тогда называли, ибо название «коллективный труд» было еще непривычным, была отослана в физический журнал в середине ноября¹³.

Мы состояли тогда в регулярной переписке с Вольфгангом Паули в Гамбурге, который с самого начала входил в самый тесный круг мюнхенских геттингенских квантовых теоретиков. Паули предпринял разработку проблемы водорода, игравшего столь важную роль в истории квантовой теории, по схеме новой квантовой механики. С помощью методики, созданной гамбуржцем Ленцем, он достиг полного успеха, и уже до завершения в Геттингене «работы трех» Паули доказал, что новая теория позволяет правильно вычислить также и спектр атома водорода. Паули сумел точно рассчитать и более сложный случай водородного атома в пересекающихся электрическом и магнитном полях. Этот успех решающим образом повысил убедительность новой механики. Здесь кончается мое описание важнейших событий 1925 года в квантовой теории, насколько они непосредственно связаны с Геттингеном; остается, пожалуй, сказать еще только несколько слов о тех трудностях, на которые я намекнул выше и которые касались проблемы «физическое содержание — математическая форма».

Разумеется, для меня было совершенно ясно огромное значение замкнутой и красивой математической формы, которую Борн и Йордан придали новой теории. Ни в одном другом городе мира не удалось бы выработать эту математическую схему так же быстро, как в Геттингене. Однако с самого начала у меня было ощущение, что главная проблема заключается не в математике, а в точке приложения математики к природе. В конце концов мы

ведь собирались описывать природу, а не просто заниматься математикой, и я опасался, что эта главная задача «работы трех» еще отнюдь не решена. Да, рассчитать энергию стационарных состояний или интенсивность линий мы умели, но как описать, скажем, траекторию электрона в камере Бильсона, поддающуюся как-никак непосредственному наблюдению, — этого мы не знали. Мы условились не говорить об орбитах и траекториях, но ведь в конце концов они все же так или иначе обладают физической реальностью. После завершения «работы трех» я написал грустное письмо к Паули, с которым всегда делился своими заботами, и одно место из этого письма мне хотелось бы вам привести: «Я приложил все усилия, чтобы сделать работу более физической, чем она была, так что наполовину я ею удовлетворен. Но общий облик теории меня все еще удручет, и я был очень рад, что Вы в своих взглядах на математику и физику стоите целиком на моей стороне. Здесь я нахожусь в среде, которая думает и воспринимает вещи диаметрально противоположным образом, и уж не знаю, может быть, я просто слишком туп, чтобы понять математику. Геттинген распадается на два лагеря: одни, как Гильберт, да и Вейль в письме к Йордану, говорят об огромном успехе, достигнутом благодаря введению матричного исчисления в физику, а другие, например Франк, говорят, что “понять матрицы в принципе никогда не удастся”». По сути дела, тут столкнулись два метода работы в теоретической физике, которые я в начале своего выступления разграничил как понятийный и математический, приписав их соответственно Копенгагену и Геттингену. Математической формулировки еще недостаточно для понятийной формулировки. Об этом совершенно ясно свидетельствует и судьба теории относительности. Сформулировав свои правила преобразований, Лоренц, по существу, уже дал ее математическую формулировку, но только Эйнштейн нашел для нее понятийное объяснение. Лоренц, пожалуй, даже предвосхитил понятийное решение проблемы, введя мнимое время наряду с абсолютным временем прежней физики, но по-настоящему вся ситуация была понята лишь несколько лет спустя Эйнштейном.

Состояние наших знаний в Геттингене к концу 1925 года можно подытожить так: математический формализм квантовой механики прочно утвердился, хотя, как обнаружилось позднее, он еще не был окончательно разработан. Как надо применять этот формализм на опы-

те — на этот счет существовали некоторые конкретные предположения, но подлинное понятийное прояснение еще не было достигнуто.

1926 год начался с сенсации. Сначала по слухам, а затем в виде корректурных листов мы получили сведения о первой работе Шрёдингера по волновой механике, где задача определения энергетических уровней в атоме водорода решалась просто как проблема отыскания собственных значений для трехмерных материальных волн. Физическая картина, из которой исходил Шрёдингер, принадлежала Луи де Броилью и выглядела совершенно иначе, чем принятая нами за основу атомная модель Бора. Но результаты получались те же самые, и важные формальные аналогии были налицо. Понятие электронной орбиты у Шрёдингера отсутствовало точно так же, как и в геттингенской квантовой механике, и в обеих теориях определение энергетических уровней стационарных состояний сводилось к проблеме собственных значений в линейной алгебре. Подозрение, что обе теории математически эквивалентны, то есть допускают взаимное преобразование, возникло очень скоро и обсуждалось повсеместно — конечно, и в нашей переписке с Паули. Уже в конце 1925 года Борн вместе с Норбертом Винером создал в Америке новую математическую формулировку квантовой механики, включавшую понятие линейного оператора и, как можно констатировать задним числом, позволявшую легко перейти к шрёдингеровскому формализму волновой механики. Правда, Борн и Винер не сумели отыскать этот переход. Уже 18 марта 1926 года Шрёдингер оказался в состоянии направить искомое доказательство эквивалентности в ежегодник «Аннален дер физик». Но, как мне помнится, Паули тоже очень рано нашел это доказательство и сообщил мне о нем в письме, хотя не опубликовал его тогда. Впрочем, память может меня здесь подвести. Во всяком случае, весной 1926 года мы уже знали, что шрёдингеровская волновая механика и геттингенская квантовая механика математически эквивалентны. Поскольку шрёдингеровский метод дифференциальных уравнений в частных производных был привычнее для физиков, чем матрицы, его было удобно применять для вычисления матричных элементов. Мы в Геттингене потратили лето 1926 года на усвоение шрёдингеровской методики, для чего каждый из нас просто-напросто написал работы по одной специальной физической проблеме, в ходе которой можно было изучить оба метода в их взаимодействии.

Борн написал статью о процессах столкновений, Йордан разработал общую теорию преобразований, а я попытался рассчитать спектр гелия, причем натолкнулся на связь между симметрией волновой функции относительно перестановочной группы и существованием некомбинирующихся энергетических уровней ортогелия и парагелия. Надо сказать, что с летнего семестра 1926 учебного года я работал в Копенгагене, но сотрудничество между тремя центрами — Геттингеном, Копенгагеном и Мюнхеном — было уже тогда столь тесным, что мы регулярно обменивались письмами и от случая к случаю встречались в одном из трех городов.

Все три работы уже имели прямое или косвенное отношение к трудной проблеме понятийного прояснения. Но прежде чем говорить об этом подробнее, я должен упомянуть о двух дискуссиях, имевших место между Шрёдингером и специалистами по квантовой механике летом 1926 года. Шрёдингер получил от Зоммерфельда приглашение в Мюнхен сделать в июле в рамках тамошнего коллоквиума доклад о своей теории. Шрёдингер понимал тогда свои волны как настоящие трехмерные материальные волны — сравнимые, скажем, с электромагнитными волнами — и намеревался полностью изгнать из квантовой теории черты прерывности, в особенности так называемые квантовые переходы. Я протестовал против этого при обсуждении доклада, поскольку, как я понимал, на таком пути невозможно объяснить даже закон теплового излучения Планка. Но к согласию тогда прийти не удалось, и другие физики в своем большинстве надеялись вместе со Шрёдингером, что квантовых переходов можно как-нибудь избежать. Потом в сентябре в Копенгагене состоялась подробная дискуссия между Бором и Шрёдингером, растянувшаяся, насколько я помню, более чем на неделю; я участвовал в ней так долго, как было возможно. Споры были страстными, и разногласия доходили до обидных упреков. В конце концов мы, копенгагенцы, убедились, что шрёдингеровская интерпретация несостоятельна и что квантовые переходы являются существенной частью внутриатомных процессов; Шрёдингер тоже, кажется, понял, что он стоит перед неразрешимыми — по крайней мере на ближайшее время — трудностями.

Тем временем Борн достиг здесь, в Геттингене, существенного прогресса. Следуя шрёдингеровскому доказательству эквивалентности, он в рамках своей теории про-

цессов столкновений исследовал шрёдингеровские волны не в трехмерном, а в многомерном конфигурационном пространстве. Он высказал гипотезу, что квадрат волновой функции можно считать мерой вероятности существования соответствующей конфигурации. Это было равнозначно тезису, что материальные волны в трехмерном пространстве не позволяют удовлетворительным образом описать природу и что квантовая теория содержит определенный статистический элемент. По следам копенгагенской дискуссии я в одной небольшой работе исследовал, прерывен или непрерывен процесс обмена энергией при резонансе между двумя атомами. Основоположения квантовой механики уже позволяли вывести это, и полученные мною результаты однозначно говорили опять-таки в пользу прерывности, то есть в пользу квантовых скачков. Наконец, разработанная Йорданом теория всеобщих унитарных преобразований, подтвержденная еще одним исследованием Дирака аналогичного содержания, показала, что квадраты элементов матрицы преобразований можно интерпретировать как вероятности перехода от одной конфигурации к другой. Но даже и после всего этого полное понятийное осмысление еще нельзя было считать достигнутым; ведь мы все еще не знали, как надо в квантовой механике описывать столь легко поддающийся наблюдению феномен, как траектория электрона в камере Вильсона.

Эта проблема почти непрерывно обсуждалась в Копенгагене в месяцы между октябрем 1926-го и февралем 1927 года. Уже в первой своей беседе со мной на Хайнберге геттингенским летом 1922 года Бор неоднократно подчеркивал, что обычный язык физики явно недостаточен для описания атомных процессов. Теперь предстояло выяснить, какие понятия этого языка следует сохранить, какие — отбросить. Причем Бор и я искали решения этой головоломки в несколько различном направлении. К тому времени я был уже настолько перевоспитан геттингенской математической школой, что считал допустимым путем последовательного применения квантовомеханического формализма распространить его выводы также и на тот остаток старых понятий, который сохранился бы в новом языке. Бор со своей стороны хотел опереться на обе, на первый взгляд исключающие друг друга, картины атома — волновую и корпускулярную — и, отталкиваясь от них, продвигаться к правильной системе понятий. Как известно, решению проблемы помогла перевернутая постановка

вопроса. Не имело смысла спрашивать: «Как представить траекторию электрона в камере Вильсона?» Необходимо было, наоборот, спросить: «Может быть, при наблюдении природы имеют место лишь такие экспериментальные ситуации, которые можно представить с помощью математического формализма квантовой теории?» Иначе говоря, следовало принять тезис Эйнштейна, высказанный им однажды в беседе со мной, что лишь теория решает, какие явления мы можем наблюдать. Ответ в таком случае напрашивался сам собой в форме принципа неопределенности. Понятие траектории надлежит применять лишь со степенью неточности, характеризующейся тем, что произведение неопределенности местоположения на неопределенность сопряженного импульса не может стать меньше кванта действия Планка. Бор пришел к аналогичным уточнениям языка благодаря сформулированному им понятию дополнительности, и лишь теперь впервые можно было ясно сказать, что следует понимать под ситуацией наблюдения и как представить ее в математических формулах. С этой интерпретацией согласился тогда даже Паули.

На этом я могу окончить свой рассказ о первых шагах квантовой механики в Геттингене. Новая теория уже в 1926—1927 годах нашла себе важные области приложения; к существеннейшим из них я мог бы причислить работы Хунда и Вигнера о подразделении термов на классы симметрии. Однако события очень быстро приобрели такой широкий размах, что их описание вышло бы далеко за рамки настоящего доклада. Я хотел бы поэтому, ограничившись этими первыми скромными шагами, буквально лишь в одной фразе сравнить сегодняшнюю физику с тогданией. Сейчас так часто говорят, что то была блестящая эпоха физики, когда за краткое времяказалось возможным сделать важнейшие открытия, а сегодня работа идет туго и часто рутинобразно. Но я не сказал бы этого о современной физике элементарных частиц. Конечно, существуют серьезные различия, обусловленные, например, тем, что все теперешние эксперименты над элементарными частицами намного более громоздки, чем эксперименты 20-х годов с электронной оболочкой атома, а также тем, что математические формы, способные служить для описания происходящих с частицами процессов, по-видимому, еще не разработаны математиками с достаточной полнотой. Но в существеннейшем отношении оба круга проблем очень схожи между собой, а именно: в фи-

зике элементарных частиц тоже существует необходимость отойти от некоторых фундаментальных понятий прежней физики. Как в теории относительности пришлось пожертвовать старым понятием одновременности, а в квантовой механике — понятием электронных орбит, так в физике частиц надо пожертвовать понятием деления или понятием «состоит из». История физики в нашем веке учит, что отказ от прежних понятий дается с гораздо большим трудом, чем усвоение новых понятий. Это приходится всегда учитывать. Но я считаю, что только тот имеет шанс добиться полной ясности в физике элементарных частиц, кто, как тогда, окажется в состоянии — да будет мне здесь позволено прибегнуть к формулировке, звучащей несколько по-восточному, — принести эту жертву не только рассудком, но и сердцем. Эта задача сегодня не менее интересна и волнующа, чем полвека назад, и я надеюсь, что молодое поколение с не меньшим воодушевлением примет участие в происходящем.