

530.145(092)

## НИЛЬС БОР И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

А. Б. Мигдал

## СОДЕРЖАНИЕ

Вступление . . . . .	303
I. «... Высшая музыкальность теоретической мысли...» . . . . .	304
1. Бор до 1913 г. . . . .	304
2. Излучение черного тела . . . . .	308
3. Гипотеза световых квантов . . . . .	313
4. «Строение атомов и молекул» . . . . .	318
5. Квантовая физика до 1923 г. . . . .	323
6. Сомнения в законах сохранения и причинности . . . . .	324
II. Физика и философия . . . . .	325
1. Новая квантовая теория . . . . .	326
2. Философия физики . . . . .	327
3. Дополнительность . . . . .	331
4. Особенности квантовой теории . . . . .	334
5. Спор Бора с Эйнштейном . . . . .	336
Заключительные замечания . . . . .	340
Список литературы . . . . .	341

...Талант попадает в цель, в которую никто  
попасть не может. Гений попадает в цель,  
которую никто не видит.

*Из А. Шопенгауэра*

## ВСТУПЛЕНИЕ

В 1961 г., когда Бор в последний раз был в Москве, я заехал за ним в гостиницу, чтобы отвезти в Институт атомной энергии, но у подъезда увидел, что он садится в машину, присланную из Академии наук. Я бросился к его сыну Оге, с которым уже тогда был давно знаком, и стал объяснять, как мне хочется, чтобы Нильс ехал со мной. Оге сказал несколько слов отцу, и, к большому неудовольствию представителей Академии, Бор послушно пересел ко мне. Надо ли объяснять, почему я это сделал? Надо ли объяснять, почему, поехав в аэропорт провожать Бора, я взял с собой своего сына, тогда еще только мечтавшего стать физиком, и дал ему донести до самолета портфель Бора? В 1929 г. на пути в Копенгаген Пауль Эренфест сказал своему лейденскому ученику, двадцатилетнему Казимиру: «Тебе предстоит познакомиться с Нильсом Бором, а это самое важное, что может случиться в жизни молодого физика».

С Нильсом Бором ушла целая эпоха, которую историки науки, вслед за Планком, стали называть «эпохой бури и натиска» квантовой теории.

Когда речь идет о художнике, мы обычно стараемся понять, в какой манере он пишет, к какому течению его причислить. Этот же вопрос можно отнести и к ученому. Некоторые физики-теоретики работают в стиле Эйнштейна, в манере Планка, другие — в стиле Ландау, Фейнмана или в совершенно ином — Гелл-Манна, но, пожалуй, ни про кого нельзя сказать, что он работает в стиле Бора. А вместе с тем Бор повлиял на формирование нескольких поко-

лений физиков. В 1922 г. в письме к Арнольду Зоммерфельду он написал странные слова: «... В последнее время я, как ученый, часто чувствовал себя очень одиноким...». Странные — потому что их сказал человек, окруженный плеядой талантливых физиков, благоговевших перед ним. В институт на Блегдамсвей приезжали работать Паули, Гейзенберг, Шрёдингер, Крамерс, Ландау, Пайерлс, Клейн, Дирак... Но неповторимость стиля Бора оказывалась причиной его научного одиночества.

Задача этой статьи — попытаться понять особенности мышления и стиля Бора. Вернер Гейзенберг писал <sup>1</sup>: «Бор был скорее философом, чем физиком, но он знал, что в наше время естественная философия приобретает силу только после того, как подвергнется неумолимому испытанию экспериментом». Точнее было бы сказать, что Бор был философом физики. Это и продиктовало отбор обсуждаемых мной работ. Оставлены в стороне те работы Бора и его предшественников, которые, как мне кажется, не помогают выявить «музыкальность теоретической мысли». Такой отбор по необходимости субъективен, но разве можно сделать что-либо, волнующее тебя, оставаясь объективным? Наверное, Бор сказал бы, что взволнованность и объективность — понятия дополнительные. Соприкосновение с великими творениями прошлого позволяет почувствовать первоначальный смысл обесцененных в наше время слов — научная революция, гениальность, озарение, духовный подвиг. . .

Обычно в биографических статьях и книгах главное внимание уделяется научным свершениям, а не способу мышления ученого. Счастливое исключение представляет книга Абрахама Пайса об Эйнштейне <sup>2</sup>, к сожалению, еще не переведенная на русский язык. В ней не только прослежен ход мыслей Эйнштейна, но тщательно проанализированы все предшествующие события в физике, на фоне которых возникли открытия, и показано, как новые идеи повлияли на последующее развитие науки. Эта статья — попытка пойти в том же направлении. Я использовал книгу Пайса не только как образец для подражания, но и как источник фактов, в частности подробностей о встречах и взаимоотношениях Бора с Эйнштейном. И, конечно, пользовался работами и книгами самого Бора, статьями и книгами о нем, в том числе глубокой и увлекательной книгой Д. С. Данина «Нильс Бор» <sup>3</sup>, где описан жизненный путь Бора от рождения до смерти. Цитаты из писем и архивных материалов приводятся без ссылок; их можно найти у Пайса <sup>2</sup> или у Данина <sup>3</sup>.

## 1. «...ВЫСШАЯ МУЗЫКАЛЬНОСТЬ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЫСЛИ...»

Эти слова были сказаны Эйнштейном по поводу статьи Нильса Бора «О строении атомов и молекул», опубликованной в 1913 г. и ставшей поворотным пунктом боровской научной биографии, когда он из талантливого молодого человека, подающего надежды, превратился в великого физика. Именно за нее Бор получил Нобелевскую премию 1922 г. — «за исследования структуры атомов и их излучения». Эта работа позволяет проследить истоки и особенности физического мышления Бора, которое найдет свое полное выражение в спорах с Эйнштейном о физическом смысле квантовой теории и методах ее описания.

Но прежде, по крайней мере для молодых читателей, напомним о событиях духовной и душевной жизни Бора, предшествовавших появлению этой работы. Иными словами, обсудим то, что англичане называли бы «background» Нильса Бора.

### 1. Б о р до 1913 г.

Бору необычайно повезло. Он родился в семье, где в равной мере сочетался широкий интерес к естественным и гуманитарным наукам, к философии. Это сочетание сейчас, в век специализации знаний, уже почти невозможно встретить.

Мать Бора — Элен Бор (Адлер) — по словам всех, знавших ее, была воплощением «нежности, бескорыстия и редкого обаяния». Возможно, от нее унаследовал Нильс мягкость, сочетающуюся у него с непреклонностью. Может быть, образ матери помог ему найти идеальную подругу ученого — Маргарет Норлунд; это будет еще одной великой удачей Бора.

Его отец — Христиан Бор — известный физиолог, автор классических работ по физико-химическим процессам дыхания. Несмотря на свой интерес к физике и химии живого, он придерживался финалистических взглядов, считая, что биологические закономерности следует воспринимать с точки зрения целесообразности, а не как результат действия физико-химических законов. Его работы дали толчок оживленным дискуссиям на одну из главных философских тем того времени — о витализме и механизме. Конечно, интересы отца повлияли на будущий интерес Нильса Бора к биологии и привели его к мысли, что правильное понимание живого возможно только на основе идеи дополнительности физико-химической причинности и биологической целенаправленности. По мнению Дж. Холтона, Бор, размышляя об этом, как бы выполнял сыновний долг.

Духовная жизнь Бора началась с увлечения философией. В их доме частым гостем был философ, профессор Копенгагенского университета Харальд Хеффдинг, автор книги «Психологические основы логических суждений». Вот одно из его высказываний: «Решения проблем могут умирать, но сами проблемы всегда пребывают живыми. Если бы это было не так, у философии не было бы столь долгой истории». Постоянно бывали в доме также физик Кристиансен — ему Бор посвятит свою работу 1913 г. — и выдающийся филолог, лингвист Вильгельм Томсен. Четверо ученых, членов Датской Академии, — Христиан Бор и его гости — регулярно встречались и беседовали на самые разные темы, иногда в присутствии Нильса и его брата Харальда, ставшего впоследствии известным математиком. Нильс Бор позже рассказывал о влиянии этих бесед на него и на его брата, о том, как они были счастливы, когда могли послушать разговоры взрослых. Это помогло им почувствовать единство научного познания, внешне различного у биолога, философа, физика и лингвиста.

Нильс и Харальд Боры были не только братьями, но и необычайно близкими по духу друзьями. Когда они принимали участие в школьных, а потом в университетских дискуссиях, всех поражала их «сыгранность». Очевидцы рассказывали, что братья Боры говорили поочередно, продолжая друг друга, — ход их мысли казался синхронным. Они оставались неразлучными всю жизнь.

Книга, которую Нильс Бор читал еще школьником, — «Приключения датского студюозуса» Пауля Мёллера — произвела на него настолько сильное впечатление, что и через много лет он будет предлагать прочесть ее всем физикам, приезжающим к нему работать. В книжке рассказывалось, как молодой человек начинает мыслить о том, как он мыслит, и приходит к заключению, что любой мысли должна предшествовать другая мысль и, следовательно, мысль должна существовать еще до своего появления ... Леон Розенфельд вспоминал, что Бор особенно отмечал места, где студент уже не может говорить от имени своих бесчисленных «я» и читает доклады о невозможности сформулировать мысль. От этих шуточных рассуждений Бор подводил своих собеседников к мысли о невозможности однозначного высказывания. Отголоски этих идей мы увидим в боровском толковании взаимодействия прибора с объектом.

Возможно, эта книга и заставила его, студента Копенгагенского университета, задуматься над проблемой свободы воли и детерминированности поведения, которая будет занимать его в будущем. Подобные вопросы увлекали и других студентов второго курса, посещавших семинары Хеффдинга. Двенадцать из них, в том числе Нильс, Харальд и их ближайший друг, математик Нильс Норлунд, брат Маргарет, будущей жены Бора, обра-

зовали философский кружок, где поочередно делали доклады. Уже здесь проявилась одна из черт будущего метода работы Бора — он предпочитал высказывать и развивать свои мысли в беседе.

В молодые годы его взволновала поэтическая проза датского философа Сёрена Кьеркегора (1813—1855), при жизни почти неизвестного за пределами Дании и получившего широкую известность в 20-е годы нашего века, когда он стал посмертно идеологом экзистенциализма. Согласно Кьеркегору, философ должен не строить философию, а переживать ее и воплощать в действиях. Позже в сознании Бора всплывут те мысли, которые он извлек из философии Кьеркегора, отбросив ее иррационализм.

Вот несколько высказываний Кьеркегора <sup>4</sup>: «... Спекулятивные [философы] в наше время глупо объективны. Они совершенно забывают, что сам мыслящий является одновременно тем музыкальным инструментом, той флейтой, на которой играет» (опять созвучие с идеей о взаимодействии прибора и объекта). Возражая мысли Гегеля о переходе количества в качество, Кьеркегор говорит: «Высшая количественная определенность так же мало объясняет скачок, как и низшая. Новое возникает скачкообразно». Он отрицает элемент непрерывности, сохраняющийся при переходе в новое. Новое качество, по Кьеркегору, появляется с внезапностью загадочного. Скачок алогичен, недоступен рациональному пониманию, не вытекает с логической необходимостью из предшествующего состояния ...

Юношеские впечатления, накапливаясь в подсознании, создавали почву, на которой родился удивительный тип мышления, отличавший Нильса Бора.

Первая научная работа Бора «Определение коэффициента поверхностного натяжения воды методом колебаний струи» была опубликована в 1909 г. <sup>5</sup>. Такой метод определения поверхностного натяжения был предложен в 1879 г. Рэлеем, построившим теорию колебаний струи для малых амплитуд колебаний. Согласно теории Рэлея, поверхностное натяжение жидкости можно определить, если известны скорость, поперечное сечение струи и длина волн, образующихся на поверхности струи. Этот метод позволяет изучать поверхностное натяжение свежееобразованной струи с идеально чистой поверхностью.

Уже здесь Бор проявил себя как будущий теоретик. Он увлекся уточнением теории Рэлея, обобщая ее на случай конечных амплитуд колебаний с учетом вязкости жидкости и плотности воздуха. Работа содержит скрупулезные расчеты — решение уравнений гидродинамики вязкой жидкости в виде ряда по степеням амплитуды колебаний.

По условиям конкурса Датского Королевского общества, на который она была представлена, работа должна быть экспериментальной.

На всю экспериментальную программу у Бора не хватило времени, и он измерил только поверхностное натяжение воды. Одновременно на конкурс была подана работа датского физика Пио Педерсена, измерившего поверхностное натяжение многих жидкостей. И хотя работа Бора не строго удовлетворяла условиям конкурса, он получил золотую медаль за развитие теории Рэлея. Золотой медали была удостоена и работа Педерсена.

Первая работа Бора содержит, по-видимому, больше математических выкладок, чем все последующие вместе взятые. С этой особенностью его работ мы еще столкнемся.

В 1909 г. Бор закончил свою магистерскую диссертацию, что у нас называется «дипломной работой», представлявшую собой обзор литературы по применению теории электронов к металлам. Эта работа послужила подготовкой к докторской диссертации (наша «кандидатская»), которую Бор защитил в 1911 г. <sup>6</sup>. В ней он анализирует и совершенствует результаты Дж. Дж. Томсона, Друде, Лоренца, Абрагама. Особенно восхищает Бора глубина и ясность работ Лоренца.

Защитив диссертацию и получив стипендию Карлсбергского фонда для стажировки за границей, Бор в 1911 г. уехал в Кембридж для работы в Ка-

вендишской лаборатории у Дж. Дж. Томсона. В 1906 г. Томсон получил Нобелевскую премию за «теоретические и экспериментальные исследования электропроводности газов», хотя, возможно, ее следовало бы присудить ему за открытие электрона (1897 г.).

Он предложил модель атома, в которой электроны движутся в положительно заряженном облаке. Окружение Томсона безоговорочно принимало эту модель.

В диссертации, которую Бор привез в Кембридж, надеясь опубликовать, в частности, опровергалось томсоновское объяснение диамагнетизма как результата ларморовского движения электронов в магнитном поле. Бор показал, что диамагнетизм электронов в объеме погашается обтекающим металл током, возникающим при отражении электронов от поверхности. По-видимому, уже тогда Бор понимал, что магнитные свойства металлов не могут быть объяснены в рамках классической механики и электродинамики.

Вряд ли Томсону понравилась критика, которую Бор выложил при первой же встрече. Неудивительно, что директор Кавендишской лаборатории, занятый помимо науки приемами и административной работой, так и не удостоился прочесть диссертацию.

О блестящих лекциях Томсона Бор с восхищением писал своей невесте Маргарет. Особенно увлекла его лекция о движении мяча для игры в гольф: «Ты и не представляешь, каким веселым и поучительным был этот доклад! С каким искрящимся юмором Томсон его прочел и какие прекрасные опыты нам показывал! Мне он пришелся по вкусу, ведь и я слегка помешан на таких вещах...».

Вскоре в Кембридж из Манчестера приехал Резерфорд. Он произвел на Бора сильнейшее впечатление.

В то время Резерфорд был в расцвете славы и таланта. За исследования по радиоактивному распаду и химии радиоактивных веществ он в 1908 г. получил Нобелевскую премию по химии, а в 1911 г. предложил планетарную модель атома. Бор сразу сделался сторонником этой модели. По приглашению Резерфорда он в марте 1912 г. уезжает в Манчестер.

Возможность общения с великим экспериментатором работавшим на переднем крае науки, оказалась большой удачей для Бора. В 1937 г. в некрологе Резерфорда Бор писал <sup>7</sup>: «Когда я впервые получил ни с чем не сравнимую возможность работать под его вдохновляющим руководством, он уже был ученым с мировой славой; но тем не менее он и тогда, и позднее был готов выслушать все, что складывалось в сознании молодого физика».

У Резерфорда в это время работают Ганс Гейгер, Эрнст Марсден, Дьердь фон Хевеши, который в 1943 г. получит Нобелевскую премию за метод меченых атомов. Бор тесно общается с ними, а с Хевеши его свяжет долгая дружба.

Дискуссии с сотрудниками манчестерской лаборатории натолкнули Бора на первые мысли о том, что порядковый номер в Периодической системе элементов совпадает с зарядом ядра и этим объясняется закон смещения при радиоактивном распаде.

Вскоре Бор вернулся в Данию. Еще перед отъездом он начал работу о торможении заряженных частиц при прохождении через вещество на основе атома Резерфорда — раньше такие расчеты основывались на томсоновской модели. Работа была опубликована в «Philosophical Magazine» в 1913 г. <sup>8</sup>. К этой задаче Бор еще вернется позже, в 1915 г. <sup>9</sup>.

Таковы были события личной и научной жизни Нильса Бора к началу работы над статьей «О строении атомов и молекул». Теперь напомним о событиях квантовой физики, предшествовавших появлению этой статьи и сформировавших Бора-физика.

К этим событиям мы будем все время возвращаться, особенно во второй части статьи, при обсуждении квантовой механики, роль Бора в создании которой невозможно переоценить.

## 2. Излучение черного тела

Еще в середине прошлого века, в 1859 г., Густав Кирхгоф установил удивительный закон: в тепловом равновесии отношение излучающей способности тела к поглощающей есть универсальная функция  $K(\nu, T)$ . Если коэффициент поглощения равен единице, тело называется «абсолютно черным». Согласно закону Кирхгофа, интенсивность излучения черного тела не зависит от вещества и устройства тела, а только от частоты и температуры.

Доказательство этого закона основывалось на невозможности «перпетуум мобиле второго рода»: если бы функция  $K(\nu, T)$  не была универсальной, одно тело могло бы неограниченно охлаждаться, нагревая другое. Общность этой формулы и неизбежность ее доказательства не могли не волновать теоретиков и экспериментаторов. Попытки найти функцию  $K(\nu, T)$  продолжались до начала XX века.

В 1883 г. Вильгельм Вин установил «закон смещения», согласно которому функция  $K$  имеет вид

$$K = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right),$$

где  $f$  — пока неизвестная функция.

В 1886 г. Вин предположил, что функция  $f \propto \exp(-a\nu/T)$  («закон Вина»). Это предположение, как станет известно позже, подтверждается экспериментально только для больших  $a\nu/T$ .

Приблизительно в это же время теорией излучения черного тела начинает заниматься Макс Планк. В работе 1900 г. «О необратимых процессах излучения»<sup>10</sup> он поставил перед собой задачу обосновать понятия энтропии и температуры для излучения. Эта статья была обзором предшествующих работ по применению второго начала к «явлениям теплового излучения, рассматриваемым с точки зрения электромагнитной теории света».

Планк показал, что, несмотря на однозначность решений уравнений Максвелла, введение статистических понятий возможно не только для механических систем, но и в чисто электромагнитной задаче.

Чтобы провести эту идею, Планку нужно было найти механизм, осуществляющий тепловое равновесие излучения. Поэтому он вводит осцилляторы (или резонаторы), взаимодействующие с излучением и представляющие собой как бы модель атомов, для которых понятия температуры и энтропии можно ввести уже известным путем и, следовательно, найти выражение для средней энергии осциллятора как функции частоты и температуры, а затем, пользуясь равенством (1), определить зависимость от этих величин интенсивности излучения.

В этой работе был получен важный результат: средняя энергия  $\bar{E}$  осциллятора частоты  $\nu$ , находящегося в равновесии с излучением, пропорциональна интенсивности излучения  $\rho$  той же частоты. Интенсивность излучения — энергия излучения в единице объема на единицу частоты — связана с функцией Кирхгофа:  $\rho = 8\pi K/c$ . Средняя энергия осциллятора

$$\bar{E}(\nu, T) = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \rho(\nu, T). \quad (1)$$

Это соотношение, согласно Планку, справедливо для любого устройства осциллятора. Осциллятор может быть колеблющимся зарядом или электромагнитным резонатором, лишь бы его затухание было малым и определялось только взаимодействием с излучением.

Соотношение Планка делается физически ясным, если использовать формулу Рэля для числа собственных электромагнитных колебаний в единице объема на единичный интервал частоты  $N_\nu = 8\pi\nu^2/c^3$ .

Энергия одного электромагнитного «осциллятора»  $E_\gamma$  равна  $\bar{E}_\gamma = \rho/N_\gamma$ , и равенство Планка сводится к равенству энергий материального и электромагнитного осцилляторов — весьма естественный результат. Две системы с одинаковыми гамильтонианами в тепловом равновесии со средой имеют одинаковую среднюю энергию:

$$\bar{E} = \bar{E}_\gamma. \quad (1')$$

Начиная эти работы, Планк еще предполагал, что закон Вина справедлив для всей области частот. Планк постулирует выражение для энтропии  $S$  осциллятора:

$$S = \frac{\bar{E}}{av} \left( 1 - \ln \frac{\bar{E}}{bv} \right). \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что из этого выражения вытекает закон Вина. Действительно, используя  $1/T = dS/dE$ , находим для средней энергии осциллятора выражение

$$\bar{E} = bv \exp \left( -\frac{av}{T} \right)$$

и, согласно (1), получаем закон Вина:

$$\rho = \frac{8\pi bv^3}{c^3} \exp \left( -\frac{av}{T} \right). \quad (3)$$

Здесь нужно остановиться. Как мог Планк не заметить или заметить, но не обсуждать, что выражение для средней энергии осциллятора находится в чудовищном противоречии с классической механикой и статистической физикой? Ведь он отлично знал закон равнораспределения энергии, доказанный за тридцать лет до того Максвеллом и Больцманом, согласно которому средняя энергия осциллятора в тепловом равновесии должна равняться  $kT$ !

Чем же объяснить молчание Планка? Единственное объяснение этого психологического парадокса состоит в том, что Планку было мучительно трудно прийти к заключению о противоречии с законами физики XIX века, которые казались незыблемыми. Он все время надеялся, что найдется безболезненный способ согласовать его результаты с классической физикой.

В июне 1900 г. появилась работа Рэлея<sup>11</sup>, в которой законы статистической физики применялись непосредственно к излучению. Рэлея сразу же обнаружил, что, в силу закона равнораспределения, интенсивность излучения должна иметь вид  $\rho = c_1 v^2 T$ . Для того чтобы выполнялся закон Вина при больших значениях  $v/T$ , Рэлея предложил соотношение (удовлетворяющее закону смещения)

$$\rho = c_1 v^2 T \exp \left( -\frac{c_2 v}{T} \right).$$

Экспериментаторы, близкие Планку, — Генрих Рубенс, Фердинанд Курлбаум, а также Отто Люммер и Петер Прингсгейм — знали соотношение Рэлея и уже в 1900 г. проверяли эту формулу.

Соотношение Рэлея представляет собой интерполяционную формулу, описывающую оба предельные случая малых и больших  $v/T$ . Естественно, что в промежуточной области оно противоречит опыту, как всегда и бывает с интерполяционными соотношениями. Но вот удивительный пример исключения из этого правила.

Проследим, как Планк впервые пришел к своей знаменитой формуле для интенсивности излучения черного тела. Это едва ли не единственный случай в истории физики, когда выражение, пригодное во всей области изменения переменных, было найдено по двум предельным случаям, т. е. когда точное соотношение было угадано с помощью интерполяционной процедуры.

Только глубоким пониманием термодинамики (учителями Планка были Кирхгоф и Гельмгольц) можно объяснить идею использовать для интерполяции не выражение интенсивности излучения, как это сделал Рэлей, а более естественную, как оказалось, величину — энтропию осциллятора. Но начнем с начала.

В 1938 г. 80-летний Планк вспоминал, что его формула была открыта в воскресенье, 7-го октября 1900 г. Днем к Планкам пришли в гости Рубенсы, и Генрих Рубенс рассказал Планку, что для малых  $\nu/T$  эксперимент дает пропорциональность интенсивности  $\rho$  температуре. В тот же вечер Планк получил формулу для  $\rho$ , которая при малых  $\nu/T$  дает пропорциональность температуре, а при больших  $\nu/T$  переходит в формулу Вина. Так был не выведен, а угадан закон распределения интенсивности по частотам — формула Планка. Здесь использованы современные обозначения:

$$\rho = \frac{8\pi\nu^3 h}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (4)$$

19 октября 1900 г. на заседании Немецкого физического общества Планк делает доклад «Об одном улучшении закона излучения Вина» <sup>12a</sup>, где рассказывает, с помощью какой процедуры он получил свою формулу. Планк предлагает использовать следующую связь между энтропией осциллятора и его средней энергией:

$$\frac{d^2 S}{d\bar{E}^2} = \frac{\alpha}{\bar{E}(\bar{E} + \beta)}.$$

Это выражение сконструировано так, чтобы получилась правильная зависимость  $d^2 S/d\bar{E}^2$  от  $\bar{E}$  в двух хорошо известных предельных случаях малых и больших  $\bar{E}$ .

Попытаемся восстановить ход рассуждений Планка. Величина  $d^2 S/d\bar{E}^2$  имеет простой физический смысл. Она определяет  $\varepsilon^2$  — среднюю квадратичную флуктуацию энергии осциллятора:

$$\left(\frac{d^2 S}{d\bar{E}^2}\right)^{-1} \sim \overline{(E - \bar{E})^2} = \bar{E}^2 - \bar{E}^2 \equiv \varepsilon^2.$$

Для малых энергий  $\bar{E}$ , что соответствует формуле Вина, имеем из (2)

$$\frac{d^2 S}{d\bar{E}^2} = -\frac{1}{a\nu\bar{E}}, \quad \varepsilon^2 \sim \bar{E}.$$

При больших  $\bar{E}$  справедлив закон равнораспределения:  $\bar{E} = kT$ , откуда следует

$$\frac{dS}{d\bar{E}} = \frac{1}{T} = \frac{k}{\bar{E}}, \quad \frac{d^2 S}{d\bar{E}^2} = -\frac{k}{\bar{E}^2}.$$

Следовательно, в этом случае  $\varepsilon^2 \sim \bar{E}^2$ . Самый простой способ описать одной формулой оба предельных случая малых и больших  $\bar{E}$ , это взять  $\varepsilon^2$  вида  $\bar{E} + \beta\bar{E}^2$ , что и соответствует выражению для  $d^2 S/d\bar{E}^2$ , использованному Планком. Отсюда же видно, что величина  $\varepsilon^2$  представляет собой самый естественный и простой объект для интерполяции.

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  определяются из предельных случаев: при малых  $\bar{E}$   $d^2 S/d\bar{E}^2 = \alpha/\beta\bar{E} = -1/a\nu\bar{E}$ , а при больших  $\bar{E}$   $d^2 S/d\bar{E}^2 = \alpha/\bar{E}^2 = -k/\bar{E}^2$ ; следовательно,  $\alpha = -k$ , а  $\beta = a\nu k = h\nu$  ( $a = h/k$ ).

Итак, выражение Планка представляет собой интерполяционную формулу

$$\frac{d^2 S}{d\bar{E}^2} = -\frac{k}{\bar{E}(\bar{E} + h\nu)},$$



дающую правильный результат как для малых, так и для больших значений  $\bar{E}$  и оказавшуюся удивительным образом верной при всех  $\bar{E}$ .

Из этой формулы, используя соотношение  $dS/d\bar{E} = 1/T$ , нетрудно получить среднюю энергию осциллятора  $\bar{E}(\nu, T)$ , а из нее, с помощью формулы (1), выражение (4). Заметим, что обозначения, использованные в этом изложении, Планк ввел не 19 октября, а несколько позже — на заседании Немецкого физического общества, 14 декабря 1900 г., когда он впервые назвал  $h\nu$  «элементом энергии», а величину  $h$  — «мировой константой».

Примерно такой ход рассуждений приводит Планк в своей статье 1943 г. «К истории открытия кванта действия».

В своей речи 19 октября 1900 г. Планк говорит, что его выбору выражения для  $d^2S/d\bar{E}^2$  предшествовало построение «совершенно произвольных уравнений для энтропии», из которых было выбрано самое простое.

Эти слова Планка навели некоторых историков физики на мысль, что в выводе Планка содержалось нечто, выходящее за пределы интерполяции. Они предпочитают называть процедуру Планка «свободным конструированием». Между тем работа Планка была вызвана к жизни именно сообщением Рубенса о пропорциональности интенсивности излучения температуре при больших длинах волн. И, кроме того, все его «произвольные выражения» с самого начала при больших  $\bar{E}$  подчинялись требованиям, которые следовали из хорошо известного Планку закона равнораспределения ( $\bar{E} = kT$ ).

Заметим, что с методологической точки зрения «интерполяция» означает двойное применение принципа соответствия (в нашем случае при малых и больших  $\bar{E}$ ) и использование требования «простоты» (выбор простейшей интерполяции).

Формула Планка (4) подтвердилась экспериментом во всех известных тогда областях частот и температур.

Сравнение с опытом позволило определить не только постоянную Планка  $h$ , но и постоянную Больцмана  $k$ . Отсюда последовало новое определение числа Авогадро  $N = R/k$ , где  $R$  — газовая постоянная. Далее, из числа Фарадея  $F$  Планк нашел заряд электрона  $e = F/N$ . Полученное Планком значение ( $e = 4,69 \cdot 10^{-10}$  CGS) близко к принятой сейчас величине ( $e = 4,803 \cdot 10^{-10}$  CGS).

Занятно, что найденное Планком значение воспринималось некоторыми физиками того времени как недостаток теории, поскольку оно противоречило принятому тогда результату Дж. Дж. Томсона ( $e = 6,5 \cdot 10^{-10}$  CGS).

Пайс замечает <sup>2</sup>: «Даже если бы Планк остановился после 19 октября, память о нем осталась бы навсегда как о человеке, открывшем закон излучения. Но его подлинное величие проявилось в том, что он пошел дальше, решив интерпретировать формулу (4), и это привело к открытию квантовой теории.» В 1931 г. Планк говорил, что это был «акт отчаяния... Я должен был получить положительный результат во что бы то ни стало, любой ценой...». По существу, вывода не было, а причина удачи стала проявляться только после того, как Эйнштейн выдвинул свою гипотезу световых квантов. Я приведу вывод Планка, почти не отступая от оригинала. <sup>12</sup>.

Пусть имеется  $N$  резонаторов (осцилляторов) частоты  $\nu$ ,  $N'$  резонаторов частоты  $\nu'$  и так далее. Задача состоит в том, чтобы найти распределение энергии между отдельными резонаторами из группы резонаторов частоты  $\nu$ . Пусть энергия  $E_N$  этой группы резонаторов состоит из точного числа равных частей  $\epsilon$ . Число таких элементов энергии  $P$  равно  $E_N/\epsilon$ . Подсчитаем, сколькими комбинациями можно распределить эти  $P$  элементов по  $N$  резонаторам. Вот одна из возможных комбинаций для  $N = 10$  и  $P = 100$ :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	38	11	0	9	2	20	4	4	5

Две комбинации будем считать различающимися, если соответствующие ряды содержат одинаковые числа, но в разном порядке. Из теории перестановок для числа возможных комбинаций  $W$  получается выражение

$$W = \frac{N(N+1)(N+2) \dots (N+P-1)}{1, 2, 3 \dots P} = \frac{(N+P-1)!}{P!(N-1)!}$$

С помощью формулы Стирлинга получаем приближенно  $W \approx (N+P)^{N+P}/N^N P^P$ . Определяя полную энтропию резонаторов как  $S_N = k \ln W$ , находим

$$S_N = NS = kN \left[ \left( 1 + \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right) - \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \ln \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right],$$

где  $\bar{E} = E_N/N$  — энергия, а  $S = S_N/N$  — энтропия одного осциллятора. Используя соотношение  $dS/d\bar{E} = 1/T$  и (1) и положив  $\varepsilon = h\nu$ , получаем формулу Планка.

Поразительно, что Планк умудряется не сказать прямо о своем главном открытии: распределение по частотам интенсивности черного излучения можно объяснить, только предположив, что энергия осциллятора частоты  $\nu$  есть целое кратное величины  $\varepsilon = h\nu$ . Осцилляторы могут принимать только дискретные значения энергии  $E_n - E_0 = nh\nu$ . Планк — убежденный сторонник классической физики — совершил великий переворот против своих убеждений!

С точки зрения физики того времени этот вывод формулы Планка не выдерживает серьезной критики. Прежде всего, в качестве статистического объекта рассматриваются элементы энергии, которым приписывается как бы смысл частиц. Между тем после работ Больцмана было ясно, что статистику можно применять только к таким величинам, для которых есть механизм «размещения». Кроме того, неубедительно использование связи между энергией и интенсивностью излучения, полученной классическим путем, тогда как в основе вывода лежит предположение о целочисленных порциях энергии каждого осциллятора, категорически противоречащее классической механике. И, конечно, последовательное применение законов статистической физики немедленно привело бы к нежелательному результату: энергия каждого осциллятора равнялась бы  $kT$ , а для излучения возникало бы то, что позже назвали «катастрофой Рэлея — Джинса», или «ультрафиолетовой катастрофой».

Но вместе с тем именно недостатки этого вывода несут на себе печать гениальности — теперь мы знаем, что тождественные элементы энергии — это фотоны и что деление числа перестановок на  $P!$  (тождественность фотонов) соответствует тому, что сейчас называется статистикой Бозе — Эйнштейна.

Через много лет, анализируя доказательство Планка, Эйнштейн напишет: «Несовершенства (этого вывода — А. М.) первоначально не были замечены, и это было необыкновенной удачей для развития физики».

В 1918 г. Планк получит Нобелевскую премию «за заслуги в развитии физики, вызванном его открытием кванта энергии».

В работе 1906 г. «К теории возникновения и поглощения света»<sup>13</sup> Эйнштейн дает глубокий анализ планковского вывода формулы излучения черного тела и приходит к заключению: «Изложенные выше рассуждения, по моему мнению, отнюдь не опровергают теорию излучения Планка; напротив, они, по-видимому, показывают, что Планк в своей теории излучения ввел в физику новый гипотетический элемент — гипотезу световых квантов».

Следующий шаг в развитии квантовой физики — работа Эйнштейна 1907 г. «Теория излучения Планка и теория удельной теплоемкости»<sup>14</sup>. Эйнштейн получает формулу для средней энергии осциллятора следующим

образом:

$$\bar{E} = \frac{\int e^{-E/kT} E \omega(E) dE}{\int e^{-E/kT} \omega(E) dE}.$$

Для классического осциллятора весовая функция  $\omega(E) = \text{const}$ , откуда получаем  $\bar{E} = kT$ . Если же осциллятор может принимать только дискретные значения энергии, кратные величине  $h\nu$ , то  $\omega(E)$  имеет резкие максимумы на этих дискретных значениях. Как мы сейчас сказали бы,  $\omega(E) = \sum_n \delta(E - E_n)$ ,  $E_n = nh\nu$ . Подставляя в  $\bar{E}$  и суммируя простые ряды в числителе и знаменателе, получаем

$$\bar{E} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (5)$$

откуда с помощью соотношения (1) находим формулу Планка.

Далее Эйнштейн использует выражение (5) для определения теплоемкости твердого тела, предполагая, что все атомы колеблются с одной частотой. Его задачей было объяснить отступление от закона Дюлонга и Пти при низких температурах. Как мы теперь знаем, предположение Эйнштейна слишком схематично, его формула дает экспоненциальное падение теплоемкости при уменьшении температуры. Но для нас существен сам факт применения идеи квантования Планка к колебаниям твердого тела. Позже Дебай<sup>15</sup>, используя формулу (5) и введя распределение упругих колебаний по частотам, получит для теплоемкости  $c$  при низких температурах  $c \approx T^3$ .

### 3. Гипотеза световых квантов

Работа Эйнштейна 1905 г. «Об эвристической точке зрения на возникновение и превращение света»<sup>16</sup> открывает следующую важную страницу в истории квантовой физики. Во вступлении к этой статье Эйнштейн говорит: «... Может оказаться, что теория света, оперирующая непрерывными пространственными функциями, приведет к противоречию с опытом, когда ее будут применять к явлениям возникновения и превращения света». И дальше: «... Согласно этому сделанному здесь предположению, энергия пучка света, вышедшего из некоторой точки, не распределяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только целиком.

Ниже я излагаю ход мыслей и факты, натолкнувшие меня на этот путь, в надежде, что предлагаемая здесь точка зрения, возможно, принесет пользу и другим исследователям в их изысканиях».

Эйнштейн начинает статью с анализа трудностей теории теплового излучения. Он применяет к осцилляторам Планка теорему о равнораспределении энергии, и обнаруживает то, что сейчас принято называть «катастрофой Рэлея — Джинса».

Далее он находит плотность энтропии излучения, которая соответствует эмпирическому закону Вина, справедливому при больших  $\nu/T$ . Если записать закон Вина в форме

$$\rho = b\nu^3 e^{-a\nu/T},$$

то для плотности энтропии  $\phi$  монохроматического излучения частоты  $\nu$  получим

$$\frac{d\phi}{d\rho} = \frac{1}{T} = -\frac{1}{a\nu} \ln \frac{\rho}{b\nu^3},$$

откуда

$$\phi(\rho, \nu) = -\frac{\rho}{a\nu} \ln \left( \frac{\rho}{b\nu^3} - 1 \right).$$

Пусть излучение находится в объеме  $v$ . Тогда энтропия равна

$$S = \nu \varphi \Delta \nu = - \frac{E}{av} \ln \left( \frac{E}{\nu b \nu^3 \Delta \nu} - 1 \right), \quad E = \rho \nu \Delta \nu.$$

Обозначая через  $S_0$  энтропию излучения в объеме  $\nu_0$ , получаем

$$S - S_0 = \frac{E}{av} \ln \frac{\nu}{\nu_0}.$$

Полагая  $a = h/k$  и обозначая  $E/h\nu = n$ , получим  $S - S_0 = k \ln (\nu/\nu_0)^n$ . Эта формула совпадает с аналогичным выражением для идеального газа, если предположить, что  $n$  — целое число.

Отсюда Эйнштейн заключает, что излучение в области больших частот, когда плотность его мала, ведет себя как газ независимых частиц с энергией  $h\nu$ .

Существенно, что при этом анализе Эйнштейн не использует полученную Планком формулу (1), а определяет энтропию излучения феноменологически, основываясь на экспериментальном законе Вина.

Пока аналогия флуктуаций плотности для излучения и для газа молекул выглядит только как интересный и неожиданный факт. Но дальше следует шаг, который делает эту работу поистине революционной.

Эйнштейн пишет: «Но если монохроматическое излучение (достаточно малой плотности) в смысле зависимости энтропии от объема ведет себя как дискретная среда, состоящая из квантов энергии величины  $h\nu$ , то напрашивается вопрос, не являются ли и законы возникновения и превращения света такими, как будто свет состоит из подобных же квантов энергии?».

Таким образом, Эйнштейн распространил планковскую идею квантования осцилляторов на электромагнитное излучение. С этой точки зрения планковский осциллятор изменяет свою энергию, испуская или поглощая соответствующий квант света.

Идею световых квантов Эйнштейн прежде всего применил к теории фотоэффекта.

Впервые фотоэффект был обнаружен Герцем в 1887 г. при исследовании распространения электромагнитных волн от излучающего резонатора к принимающему. Когда Герц закрыл принимающий резонатор экраном, чтобы лучше видеть проскакивающую искру, обнаружилось, что экран влияет на условия образования разряда и что причина этого — свет от искры излучателя. Он исследовал это явление и показал, что при освещении экрана светом электрической дуги, ионизация воздуха за экраном увеличивается, и искра проскакивает при меньшем напряжении.

Фотоэффект, так же как радиоактивность и рентгеновские лучи, был открыт случайно. Но история науки показывает, что подобные «случайности» почти всегда происходили у первоклассных экспериментаторов.

В 1888 г. А. Г. Столетов исследовал фотоэффект более детально и установил, что освещение металлической пластины вызывает поток отрицательных частиц, причем величина электрического тока пропорциональна интенсивности излучения.

Позже фотоэффект изучался многими авторами. Подробное исследование было начато в 1902 г. Филиппом Ленардом. В 1905 г. он получил Нобелевскую премию «за исследование катодных лучей». Он установил замечательный факт, что энергия вылетающих при фотоэффекте электронов совершенно не зависит от интенсивности падающего света.

Это был тот самый Ленард, который позже приобрел геростратову славу, сделавшись официальным главой физики в гитлеровской Германии и возглавив борьбу с «еврейской физикой», в частности с теорией относительности.

Из гипотезы световых квантов Эйнштейн получает для фотоэффекта

$$E_{\max} = h\nu - P,$$

где  $E_{\max}$  — максимальная энергия вылетающих электронов, а  $P$  — работа выхода — энергия, которая требуется, чтобы удалить электрон из вещества.

Эту формулу можно записать и в виде  $E_2 - E_1 = h\nu$ , где  $E_2 - E_1$  — изменение энергии электрона при поглощении кванта. Но в такой форме это соотношение уже крайне близко к тому условию частот, которое в 1913 г. будет постулировать Бор. И, разумеется, оно помогло Бору придти к его постулату. Макс Борн в своих «Лекциях по атомной механике»<sup>17</sup> говорит: «После того как Бор показал большую плодотворность этого уравнения на примере водородного атома, оно стало называться условием частот Бора».

Таким образом, формула Эйнштейна предсказывала, что функция  $E_{\max}(\nu)$  — прямая линия с не зависящим от вещества наклоном, который определяется постоянной Планка, найденной из распределения интенсивности излучения черного тела.

Подробное экспериментальное подтверждение этих соотношений было сделано только в 1915 г. Робертом Миллиkenом. В том же году в Гарварде Уильям Дуэн и Франклин Хант нашли еще одно подтверждение, изучая рентгеновские лучи. Верхняя граница частоты рентгеновских лучей определялась соотношением  $h\nu_m = eV$ , где  $V$  — потенциал, в котором ускорялись электроны. Это соотношение было предсказано Эйнштейном в его работе 1906 г.<sup>13</sup>

В работе 1909 г. «К современному состоянию проблемы излучения»<sup>18</sup> Эйнштейн еще раз возвращается к свойствам излучения и получает формулу для флуктуации энергии равновесного излучения.

Вывод этой формулы основывается на простом выражении, полученном Эйнштейном в работе «К общей молекулярной теории теплоты»<sup>19</sup>. Из определения средней энергии на с. 313 дифференцированием по  $\beta = 1/kT$  легко получить

$$\epsilon^2 = \overline{E^2} - \bar{E}^2 = -\frac{\partial \bar{E}}{\partial \beta} = kT^2 \frac{\partial \bar{E}}{\partial T}.$$

Для равновесного излучения  $\bar{E} = \rho v \Delta\nu$ , где  $\rho$  — плотность энергии излучения на единицу частоты, а  $v$  — рассматриваемый объем. Используя для  $\rho$  планковское выражение (4), получаем

$$\epsilon^2 = \bar{E}h\nu + \frac{c^3 \bar{E}^2}{8\pi v^2 \Delta\nu v}. \quad (6)$$

Это соотношение приобретает особенно простой вид, если рассматривать флуктуации энергии  $E_\gamma$  одного электромагнитного колебания. Средняя энергия колебания  $\bar{E}_\gamma = \bar{E}c^3/8\pi v^2 v \Delta\nu$ . Вместо (6) получаем

$$\epsilon_\gamma^2 = \overline{E_\gamma^2} - \bar{E}_\gamma^2 = \bar{E}_\gamma h\nu + \bar{E}_\gamma^2. \quad (6')$$

Именно такое выражение использовал Планк в своем интерполяционном выводе формулы (4) (с заменой  $\bar{E}_\gamma$  на  $\bar{E}$ ). Формула (6') справедлива для любого осциллятора в тепловом равновесии (системы с одинаковыми гамильтонианами одинаково флуктуируют).

При малых значениях  $h\nu/kT$ , когда формула Планка переходит в закон Рэлея — Джинса (классический предел), остается только второе слагаемое, представляющее собой вызванную интерференцией флуктуацию плотности энергии электромагнитных волн. При малой плотности излучения, когда формула Планка переходит в закон Вина, остается только первое слагаемое, которое следует интерпретировать как флуктуации энергии, вызванные корпускулярной структурой света.

Действительно, разделив левую и правую части выражения (6) на  $(h\nu)^2$  и полагая  $\bar{E} = \bar{n}h\nu$ , получим выражение для флуктуаций числа квантов:

$$(\overline{n - \bar{n}})^2 = \bar{n} + \frac{c^3}{8\pi v^2 \Delta\nu v} \bar{n}^2, \quad (\overline{n_\gamma - \bar{n}_\gamma})^2 = \bar{n}_\gamma + \bar{n}_\gamma^2.$$

Первое слагаемое действительно имеет вид флуктуаций классического газа. Поразительно, как глубоко связано распределение Планка с корпускулярной структурой света!

Поучителен метод, которым пользуется Эйнштейн при рассмотрении флуктуаций плотности импульса равновесного излучения. В излучение вносится зеркало, движущееся в направлении, перпендикулярном своей плоскости, и пропускающее все волны, кроме лежащих в интервале  $\nu$ ,  $\nu + \Delta\nu$ , которые полностью отражаются. К зеркалу применяются законы статистического равновесия. В результате получается формула, аналогичная (6), тоже состоящая из двух слагаемых, одно из которых имеет волновую природу и соответствует флуктуациям светового давления системы волн, а другое следует понимать как флуктуации импульса, передаваемого зеркалу квантами.

В работе «О развитии наших взглядов на сущность и структуру излучения»<sup>20</sup> (доклад на конференции в Зальцбурге в 1909 г.) Эйнштейн говорит: «... Я считаю, что следующая фаза развития теоретической физики даст нам теорию света, которая будет в каком-то смысле слиянием волновой теории света с теорией истечения». Пайс видит в слове «слияние» первый намек на идею дополненности. Мне кажется, что мысль Эйнштейна была слишком общей и не имела той конструктивной ценности, которую имеет принцип дополненности.

Далее Эйнштейн с изумительной глубиной и простотой показывает, рассматривая движение того же зеркала, что без учета флуктуаций импульса квантов невозможно тепловое равновесие между молекулами газа и излучением. Здесь впервые, хотя и неявно, вводится импульс кванта.

Эти работы заставляют задуматься над некоторым обеднением теоретической физики, которое произошло вместе с обогащением ее методического аппарата. Современные работы, кроме новаторских, всё в меньшей степени основываются на качественных соображениях. В них исчезает то, что Эйнштейн называл «музыкальностью теоретической мысли». Никто уже не станет пользоваться кусочком зеркала для получения новых соотношений или «угольной пылинкой», которую достаточно было внести в поле излучения, чтобы сделать его равновесным, или другими мысленными экспериментами. Теоретическая техника все больше формализуется, стиль работ в массе своей бледнеет, как произведение ювелира, поставленное на поток ...

Эйнштейновские исследования гипотезы световых квантов заканчиваются в 1916 г. работой «К квантовой теории излучения»<sup>21</sup> (эта же работа была опубликована и в 1917 г.<sup>21</sup>). Рассматривается равновесие между молекулами и излучением. Эйнштейн вводит вероятности индуцированного излучения и поглощения, а также вероятность спонтанного излучения. Пользуясь принципом детального равновесия, он удивительно простым путем получает формулу Планка. Напомним этот вывод.

Согласно детальному равновесию,

$$p_n e^{-\varepsilon_n/kT} B_n^m \rho = p_m e^{-\varepsilon_m/kT} (B_m^n \rho + A_m^n);$$

здесь  $n$  и  $m$  — два состояния молекулы,  $p_n$  и  $p_m$  — статистические веса состояний,  $B_n^m$  и  $B_m^n$  — вероятности индуцированного поглощения и испускания,  $A_m^n$  — вероятность спонтанного испускания. При росте  $T$  неограниченно растет  $\rho$ , и поэтому  $p_n B_n^m = p_m B_m^n$ . Отсюда находим

$$\rho = \frac{A_m^n/B_m^n}{e^{(\varepsilon_m - \varepsilon_n)/kT} - 1}.$$

Используя закон Вина, находим  $A_m^n = (8\pi h\nu^3/c^3) B_m^n$ ,  $\varepsilon_m - \varepsilon_n = h\nu$ , откуда и следует формула Планка.

Затем, исследуя равновесие между молекулами и излучением, Эйнштейн заключает, что молекула, поглощая или испуская квант энергии  $h\nu$ , получает или отдает импульс, равный  $h\nu/c$ .

Пайс справедливо считает странным, что создатель специальной теории относительности написал рядом две формулы  $\varepsilon = h\nu$  и  $p = h\nu/c$  только через одиннадцать лет после введения квантов света. Впрочем, световой квант не обязательно имеет определенный импульс. Так например, для задачи внутренней конверсии  $\gamma$ -лучей удобнее пользоваться квантами в сферическом представлении, где импульс кванта неопределен и в среднем равен нулю, а определенное значение имеет момент количества движения.

Самое важное в этой работе Эйнштейна — введение вероятности для описания микрообъектов. Кроме вероятностей спонтанного и индуцированного излучения приходится еще предположить случайное направление вылета кванта из молекулы — направление вылета не может быть предсказано.

Впервые вероятность спонтанного испускания была введена Резерфордом в 1900 г., когда он написал уравнение для радиоактивного распада.

Кто решает, в какой момент и в каком направлении вылетит частица? Эйнштейн до конца своих дней считал вероятностное описание недостатком теории.

Даже после экспериментов Милликена, Дуэна и Ханта гипотеза световых квантов не вызывала у физиков доверия. В 1913 г. Планк, Нернст, Рубенс и Варбург выдвинули Эйнштейна в члены Прусской академии наук. Пайс в своей книге приводит заключительную часть их рекомендации: «В целом можно сказать, что вряд ли найдется какая-нибудь из важных проблем современной физики, в решение которой Эйнштейн не внес бы замечательного вклада. То, что он иногда не попадает в цель, как например, в случае гипотезы световых квантов, нельзя считать отрицательным аргументом, поскольку невозможно выдвинуть новую идею, даже в наиболее точной науке, без некоторой доли риска».

На Сольвеевском конгрессе 1911 г. Эйнштейн подчеркнул предварительный характер гипотезы световых квантов, поскольку эту идею трудно согласовать с хорошо проверенными следствиями волновой теории. Это замечание, продиктованное научной добросовестностью, многими было воспринято как отступление. В 1916 г. Милликен говорит: «Я полагаю, что сам Эйнштейн больше не придерживается этой гипотезы». В 1918 г. Резерфорд, комментируя результат Дуэна — Ханта, писал: «До настоящего времени нет разумного физического объяснения этого замечательного соотношения между энергией и частотой».

Отрицательное отношение физиков к гипотезе световых квантов сказалось даже в формулировке Нобелевского комитета. Эйнштейн получил Нобелевскую премию 1921 г. (она была вручена ему в 1922 г.) «за вклад в теоретическую физику и особенно за открытие закона фотоэффекта». Об открытии квантов электромагнитного поля — ни слова.

Чем объясняется такое упорное неприятие этой гипотезы? Пайс называет две причины. Одна — очевидная — невозможность в то время согласовать гипотезу квантов с электромагнитной теорией света. Вторая связана с тем, что, в отличие от открытий Планка и Бора, эта гипотеза не приводила к столь подробным и точным предсказаниям.

И все же сейчас такую предубежденность трудно понять. Ведь если к излучению применима статистическая физика (Рэлей, 1900<sup>14</sup>), то естественно перенести также и мысль о квантовании материального осциллятора на «осцилляторы», соответствующие стоячим или бегущим волнам электромагнитного поля в ящике. Это обобщение было сделано Эренфестом (1906) и Дебаем (1910). Они получили формулу Планка, распространив идею о дискретности возможных значений энергии на электромагнитные степени свободы. Но эта дискретность почему-то не связывалась непосредственно с проблемой

дуализма волн-корпускул, хотя, возможно, Эйнштейн чувствовал эту связь и поэтому никогда не отступал от гипотезы световых квантов.

Только в 1923—1924 гг. после исследования комптон-эффекта кванты перестали быть гипотетическими частицами. Термин «фотон» был введен Дж. Льюисом в 1926 г. в работе, где он рассматривал квант света как некий неделимый атом. Его идеи были быстро забыты, но новый термин немедленно прижился. В октябре 1927 г. состоялся V Сольвеевский конгресс, который был посвящен «электронам и фотонам». Фотон стал полноправной элементарной частицей со спином 1 и массой, равной нулю.

#### 4. «Строение атомов и молекул»

В 1911 г. Резерфорд опытами по рассеянию  $\alpha$ -частиц показал неизбежность планетарной модели атома. Эта дата может считаться началом ядерной эры. Значение этого открытия для теоретической физики того времени позже очень точно охарактеризовал Бор<sup>1</sup>: «Решающим моментом в атомной модели Резерфорда было то, что она со всей ясностью показала: устойчивость атомов нельзя объяснить на основе классической физики, и квантовый постулат — это единственно возможный выход из острой дилеммы. Именно эта острота несоответствия заставила меня абсолютно поверить в правильность квантового постулата».

Бор приехал в Манчестер весной 1912 г, когда вся резерфордовская лаборатория была охвачена стремлением выяснить преимущества и недостатки этой модели. Как мы уже говорили, Бор сразу сделался ее сторонником. Впрочем, спустя много лет, в июне 1922 г., он скажет юному Гейзенбергу: «Я никогда не воспринимал планетарную модель буквально...»

В конце 1912 г. Бор, уезжая в Данию, оставил Резерфорду «Памятную записку», которая лишь частично сохранилась в архивах. В ней впервые появилась идея устойчивых орбит — догадка о неклассических закономерностях в микромире и о связи электронных орбит со строением Периодической системы элементов. В ответ он получил наставление «не спешить», очень непохожее на Резерфорда, который сам всегда с колоссальной энергией брался за дело, доводил работы до конца никогда не останавливаясь на полпути. Резерфорд полагал, что никто этими проблемами не занимается.

Вскоре Бор обнаруживает, как ошибался Резерфорд. В журнале «Ежемесячные записки» Королевского астрономического общества Великобритании было напечатано несколько статей кембриджского астрофизика Дж. Никольсона, посвященных теоретической интерпретации спектрального излучения звезд<sup>22</sup>. Никольсон распространил идею Планка на атомы, предположив квантование момента электрона (точнее, проекции момента):  $M = nh/2\pi$ ,  $n$  — целое число. Таким образом, возник атом с дискретными орбитами, на каждой из которых вращались группы электронов. Никольсон предполагал — это было естественно в то время, — что электроны излучают электромагнитные волны с частотой, равной частоте обращения. Вспомним, что осцилляторы у Планка имели дискретные значения энергии, но излучали свет с частотой, равной частоте классических колебаний осциллятора. Такое предположение приближенно годилось для сильно возбужденных атомов, и Никольсон объяснил многие особенности излучения звезд и туманностей.

Событие, которое стало для Бора последним толчком, произошло в начале февраля 1913 г. По чистой случайности он встретил своего приятеля студенческих лет Ханса Хансена, специалиста по спектроскопии. Когда Бор рассказывал ему свои идеи строения вещества на основе планетарного атома с устойчивыми по неведомым причинам орбитами, Хансен спросил: «А как твоя теория объясняет спектральные формулы?». И тут, к его огромному удивлению, обнаружилось, что Бор ничего не знает о спектральных формулах, полученных Бальмером (1885), Ридбергом (1890) и Ритцем (1908)...



Бор вспоминал: «Как только я увидел формулу Бальмера, мне все сразу же стало ясно». Это было вспышкой, осветившей всю картину, — менее чем за месяц была готова первая, самая существенная часть работы «О строении атомов и молекул»<sup>23</sup>.

Статья Бора начинается с общих физических соображений. Затем следует получение спектров и постоянной Ридберга из размерных соображений и, наконец, теория, в которой неопределенный при оценках коэффициент находится из принципа соответствия.

Для нас важно, что в этой работе Бор привел наводящие соображения, которые помогли ему получить результат. К сожалению, в современных статьях этого не бывает.

В статье проявляется характерная особенность боровских доказательств: он приводит аргументы, каждый из которых недоказателен, но которые в целом создают убедительную картину.

Во введении Бор замечает, что классический атом Резерфорда не имеет радиуса, т. е. не имеет величины размерности длины. Радиус появляется только после введения постоянной Планка.

Первую часть статьи, которая называется «Связывание электронов положительным ядром», Бор начинает с классических выражений для частоты  $\nu_0$  обращения электрона по эллиптической орбите и для большой полуоси  $a$ . В современных обозначениях эти соотношения имеют вид

$$\nu_0 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{W^{3/2}}{Ze^2 \sqrt{m}}, \quad a = \frac{Ze^2}{2W}; \quad (7)$$

здесь  $W$  — энергия вырывания электрона с данной орбиты.

Дальше Бор говорит о неприменимости классической электродинамики, которая привела бы к падению электрона на ядро, чего не происходит в природе, — реальный атом длительное время имеет определенные размеры и частоты. Кроме того, излучаемая атомом энергия неизмеримо меньше, чем та, которая выделилась бы при падении электрона на ядро. Затем он переходит к оценкам энергии и радиуса. Из планковской теории излучения следует, что количество энергии, испускаемой при каждом акте излучения, равно  $h\nu$ . Теперь допустим, говорит Бор, что электрон сначала попадает на высокую орбиту с малой частотой обращения; тогда он перейдет на окончательную орбиту, испустив  $n$  порций излучения. Допустим, что средняя испускаемая частота  $\bar{\nu}$  есть половина окончательной частоты обращения  $\nu_0$ . Тогда энергия вырывания равна  $W = nh\nu_0/2$ . И такая оценка приводит к точному результату! Это один из примеров поразительной интуиции Бора.

Подставляя  $\nu_0$  из этой оценки в выражение (7), получаем

$$W = \frac{mZ^2e^4}{\hbar^2} \frac{1}{2n^2}, \quad \nu_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{m(Ze^2)^2}{\hbar^3 n^3}, \quad a = \frac{\hbar^2}{me^2} \frac{n^2}{Z}. \quad (8)$$

Если в этих выражениях изменять  $n$ , получатся  $W$  и  $a$ , соответствующие возможным конфигурациям системы. Это и будут, по Бору, стационарные состояния, находясь на которых электрон не излучает.  $W$  максимально, когда  $n$  равно единице. Это соответствует наиболее устойчивой орбите. Подставляя известные в то время экспериментальные значения для  $e$ ,  $m$  и  $h$ , Бор получает оценки:  $a = 0,55 \cdot 10^{-8}$ ,  $\nu_0 = 6,210^{15}$ ,  $W/e = 13$  эВ, и заключает: «Мы видим, что эти величины того же порядка, что и линейные размеры атомов, оптические частоты и ионизационные потенциалы».

Далее Бор ссылается на работы Никольсона, о которых мы уже упоминали. Он показывает неправильность основного тезиса Никольсона о том, что частота излучения совпадает с частотой обращения — ведь после излучения каждой порции энергии частота обращения изменяется. Теория Никольсона неспособна объяснить формулы Бальмера и Ритца.

Бор перечисляет допущения, сделанные в его расчетах: «1. Динамическое равновесие системы в стационарных состояниях можно рассматривать

с помощью обычной механики, тогда как переход из одного стационарного состояния в другое нельзя трактовать на этой основе. 2. Указанный переход сопровождается испусканием монохроматического излучения, для которого соотношение между частотой и количеством выделенной энергии именно такое, которое дает теория Планка». И затем знаменательное высказывание, которое я приведу полностью: «Первое допущение напрашивается само собой, поскольку известно, что при расчете движения электронов обычная механика теряет свою абсолютную применимость и справедлива только для средних значений. С другой стороны, при расчетах динамического равновесия в стационарном состоянии, в котором нет относительных смещений частиц, нет необходимости различать действительные движения и средние». Здесь содержится предположение, аналогичное допущению Эйнштейна о том, что соотношение (1), полученное Планком для классического осциллятора, сохраняется и при учете квантования. Но, кроме того, имеется намек на будущую, как мы сейчас знаем, ошибочную мысль Бора о том, что законы сохранения в микросистемах выполняются только в среднем. Догадка о связи средней излучаемой частоты с частотой обращения в конечном состоянии будет подтверждена позже с помощью принципа соответствия.

Второй параграф «Испускание линейчатых спектров» начинается со слов: «Вся совокупность опытных данных указывает на то, что атом водорода состоит просто из единственного электрона, вращающегося вокруг положительного ядра с зарядом  $e$ ». Это допущение мотивируется тем, что в опыте Дж. Дж. Томсона с положительными лучами водород — единственный элемент, который никогда не встречается с положительным зарядом, большим электронного. Таков был тогдашний уровень заключений о свойствах атомов.

Из (8) Бор получает выражение для частоты излучения  $h\nu = W_2 - W_1$ :

$$\nu = RZ^2 \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad R = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3}, \quad (9)$$

из которого при  $n_2 = 2$  получается серия Бальмера, а при  $n_2 = 3$  — инфракрасная серия, предсказанная Ритцем и наблюдавшаяся Пашеном. Вычисленная постоянная Ридберга  $R$  отличается от наблюдаемой всего на несколько процентов.

Далее следует замечание о том, что количество наблюдаемых линий в серии лимитируется условием, чтобы размеры атома, растущие с увеличением  $n$ , не превышали расстояния между частицами газа, в котором наблюдается излучение.

Бор обращает внимание на то, что из его теории нельзя получить другие серии, которые приписывали водороду, и что их естественно приписать гелию. Действительно, при  $Z = 2$  выражение (9) дает серии, полученные Фаулером и Пикерингом.

Для сложных атомов существовало правило Ридберга — Ритца:  $\nu = F_i(n_2) - F_k(n_1)$ , где  $F_i(n) = K/(n + \alpha_i)^2$ . Бор показывает, что  $K$  — универсальная константа, равная постоянной Ридберга. Вот его рассуждение: для больших  $n$  любой атом делается водородоподобным, поскольку орбита превышает атомные размеры, и, следовательно, константа  $K = R = 2\pi^2 me^4/h^3$ .

В третьем параграфе, продолжая общие соображения, Бор задается целью получить свои результаты без произвольного предположения о средней частоте излучаемого света. Он полагает, что энергия  $W$  связана с частотой  $\nu_0$  соотношением  $W = f(n)h\nu_0$ , и тогда, из формулы (7), частота излучения равна

$$\nu = Z^2 \cdot \frac{1}{4} \left( \frac{1}{f^2(n_1)} - \frac{1}{f^2(n_2)} \right) R.$$

Для получения серии Бальмера необходимо положить  $f = \text{сн.}$  Чтобы определить  $c$ , Бор рассматривает большие  $n$  и приравнивает частоту излучения частоте обращения, т. е., по существу, использует то, что позже стало называться принципом соответствия. Получается  $c = 1/2$ , что и подтверждает оценку, сделанную им в начале статьи. Таким образом, для подтверждения оценки надо допустить, во-первых, что «излучение испускается в виде порций  $h\nu$ , и, во-вторых, что частота излучения, испускаемого при переходе системы из одного состояния в соседнее, совпадает с частотой обращения электрона в области больших длин волн. Поскольку, — продолжает Бор, — все допущения, лежащие в основе излагаемой теории, имеют фундаментальный характер, мы вправе ожидать, если вообще весь наш метод рассмотрения справедлив, абсолютного, а не только приближенного совпадения наблюдаемого и вычисленного значений этой константы (константы Ридберга. — А. М.). Поэтому формула (9) может быть использована при обсуждении экспериментального определения констант  $e$ ,  $m$ ,  $h$ ».

Далее Бор показывает, что, предполагая круговое движение и используя равенство модуля полной энергии средним значениям кинетической энергии, получаем из (8) квантование момента — момент электрона равняется целому кратному  $h/2\pi$ , независимо от заряда ядра. При этом Бор ссылается на Никольсона.

Заметим, что Бор в своем расчете не предполагал круговых орбит. Его исходные формулы (7) соответствуют общему случаю эллиптического движения. Он неявно использовал тот факт, что энергия водородоподобного атома с большой точностью зависит только от главного квантового числа.

Бор замечает: если рассматривать свободный электрон как состояние с очень большим числом  $n$ , то условие для частоты совпадет с формулой Эйнштейна для фотоэффекта. Это еще один аргумент в пользу боровского постулата о связи энергии с частотой.

В следующем четвертом параграфе «Поглощение излучения» Бор объясняет монохроматическое рентгеновское излучение, которое «испускается при рекомбинации системы после предварительного удаления сильно связанного электрона, например, при соударении с катодными частицами». Аналогичные соображения применяются затем к возможным изменениям энергии быстрого электрона, проходящего через атом. Он «теряет энергию определенными конечными квантами».

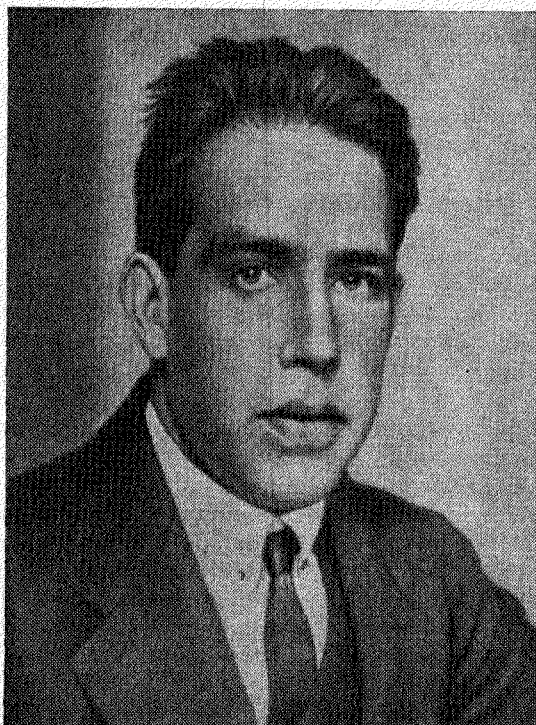
На шестидесяти четырех страницах статьи Бор проанализировал с точки зрения своей теории все существовавшие тогда экспериментальные данные, касавшиеся атомов и молекул. Его излюбленный прием — показывать одну и ту же формулу в разных проявлениях. Убедительность рассуждений достигается не каким-либо одним бесспорным фактом, а общей картиной. Именно эта особенность, наверное, и вызвала желание Резерфорда сократить статью. Он не раз упрекал Бора за многословие: «Длинные статьи отпугивают читателей. Английский обычай — излагать предмет очень кратко и выразительно, в противоположность германской методе, которая почитает добродетелью умение быть по возможности скучно-многоречивым». Резерфорд должен был представить статью Бора в «Philosophical Magazine» и прислал ему письмо с припиской: «Я надеюсь, что Вы не будете возражать, если я по своему усмотрению изыму из Вашей статьи те места, которые мне покажутся не необходимыми!...». Получив письмо, Бор бросился в Манчестер и в долгих спорах отстаивал все свои положения и формулировки, причем статья не стала короче. Все сотрудники Бора говорили, что любая попытка сократить написанное им приводила к тому, что исправленный вариант оказывался еще длиннее.

Как уже было сказано, Бор приписал гелию спектральные линии Пикеринга и Ридберга, которые Фаулеру удалось увидеть в лабораторной установке. Бор подробно анализирует эту мысль в короткой работе 1913 г. «Спектры водорода и гелия»<sup>24</sup>.

Если бы разница между водородом и гелием определялась только зарядом ядра, величина

$$K = \lambda \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

для водорода должна была бы быть в четыре раза больше, чем для гелия, между тем эксперимент дает 4,0016 — близко к четырем, но отклонение превышает ошибку эксперимента. Недостаточно точно известные константы  $e$ ,  $m$  и  $h$  в это отношение не входят. Бор объясняет несовпадение разницей приведенных масс электрона в водороде и гелии. Используя исправленную



Нильс Бор, 1916 г.

таким образом формулу, он получает теоретическое значение 4,00163 в точном соответствии с экспериментом.

Точнейшее совпадение результатов теории с экспериментом придало особую убедительность теории Бора.

В этой же работе Бор предсказал целый ряд других линий гелия, которые должны несколько сместиться по сравнению с линиями Бальмера, а не совпадать с ними, как следовало из прежней точки зрения. Через год Эванс обнаружил эти линии в заранее рассчитанных местах. Результаты Эванса в большой мере определили отношение Эйнштейна к теории Бора.

Хевеши писал Бору: «Когда я спросил его (Эйнштейна. — А. М.), что он думает о Вашей теории, он ответил, что это очень интересная, очень важная теория, если, конечно, она не ложная, и т. д., и т. п., и что у него много лет тому назад были очень похожие идеи, но не хватило пороку их развить. Я сообщил ему, что теперь уже доказано, что спектр Пикеринга — Фаулера принадлежит гелию. Он был потрясен и лишь промолвил: «Но в таком случае частота света совершенно не зависит от частоты электрона! (Я его понял так??) Это же колоссальное открытие! Значит, теория Бора должна быть правильной».

Отсюда видно, что было самым трудным в работе Бора. Планк применил квантование энергии к осциллятору, Эйнштейн — к излучению и к упругим колебаниям, Никольсон — к атому. Главная трудность была в том, чтобы решиться на отказ от равенства частоты излучения частоте обращения на орбите!

Эти статьи Бора дали решающий толчок всему дальнейшему развитию атомной физики. Но тогда он проявил себя не как философ, которым сделается в дальнейшем, а как первоклассный физик-теоретик с глубокой интуицией, склонный к оценкам и качественному пониманию явлений в большей мере, чем к их математическому описанию. Гейзенберг в статье «Квантовая теория и ее интерпретация»<sup>1</sup> пишет: «...Математическая ясность сама по себе не представляла для Бора какой-то особой ценности. Он опасался, что формальная математическая структура скроет физическую сущность проблемы, и был убежден, что законченное физическое описание должно безусловно предшествовать математической формулировке».

### 5. К в а н т о в а я   ф и з и к а   д о   1923   г.

Нобелевская речь Нильса Бора «Строение атома» (1922)<sup>25</sup> содержит краткий обзор важнейших экспериментальных и теоретических событий квантовой физики. Вот конспективное изложение этой речи.

Наиболее прямым подтверждением боровской теории атома были опыты Франка и Герца по возбуждению атома потоком электронов. Примерно к этому же времени (1913—1914) относятся работы Мозли — эксперименты по определению зависимости между частотой спектральных линий характеристического рентгеновского излучения и порядковым номером элемента, доказавшие равенство заряда ядра и порядкового номера. Эксперименты подтвердили теорию Бора, согласно которой  $\nu_\alpha = RZ^2$ .

Бор упоминает в своей речи теорию многократно периодических движений, условия квантования (Бора — Зоммерфельда (1915—1916). — А. М.), появление новых квантовых чисел, объяснение тонкой структуры спектральных линий водорода и гелия и тонкой структуры рентгеновских спектров (Зоммерфельд, 1915), объяснение эффекта Штарка (Шварцшильд, Эпштейн, 1916), теорию эффекта Зеемана, из которой следовало пространственное квантование (Зоммерфельд, Дебай, 1917) и поразительное подтверждение этого предсказания в опытах Штерна и Герлаха (1922), и, наконец, развитие принципа соответствия (Бор, Эренфест, Эйнштейн).

Если в работе 1913 г. идея соответствия используется только для определения численного множителя в постоянной Ридберга, то теперь, начиная с работы Бора 1918 г.<sup>26</sup>, принцип соответствия служит для определения интенсивности и поляризации спектральных линий (Крамерс, 1920).

В своей речи Бор отмечает, что существующая квантовая теория дает объяснение молекулярным спектрам в удовлетворительном согласии с опытными фактами.

Затем он переходит к подробному обсуждению таблицы Менделеева в свете теории атома. Дается «... объяснение характерным отклонениям от простой периодичности в системе элементов» и прослеживается образование семейства редкоземельных элементов. Это позволило предсказать свойства элемента с атомным номером 72, который Довийе ошибочно относил к редкоземельным. В 1923 г. Костер и Хевеши доказали, что этот элемент, как и следует из теории, по химическим свойствам близок цирконию. Он был назван «гафнием» в честь древнего названия Копенгагена.

При обсуждении таблицы Менделеева Бор ввел предположение, предвосхитившее принцип запрета Паули (Паули, 1925—1926). Ему пришлось допустить, что замкнутые конфигурации энергетически выгоднее и после заполнения оболочки электроны занимают только более высокие орбиты. Эта гипотеза несомненно помогла Паули прийти к его принципу запрета.

Бор подводит итог всему развитию старой теории атома в 1923 г. в статье «О применении квантовой теории к строению атома. 1. Основные постулаты квантовой теории»<sup>27</sup>. Для нас особо интересен последний раздел «О формальной природе квантовой теории», в которой Бор задается вопросом, как согласовать понятие прерывности в атоме с непрерывностью классической электродинамики. Он рассматривает возможные пути преодоления этой трудности и, как один из них, гипотезу световых квантов Эйнштейна, согласно которой «...распространение излучения происходит не путем обычного волнового движения, а так, что энергия... сконцентрирована на небольшом участке, и процесс поглощения выступает как целое...». Из следующей фразы видно, как Бор в то время относился к идее световых квантов: «...Именно эта гипотеза приводит к непреодолимым трудностям при объяснении явлений интерференции...». И дальше: «...Поэтому гипотеза световых квантов непригодна для того, чтобы дать общую картину процессов...».

Другой путь — допустить, что вероятность различных процессов обмена между атомом и электромагнитными волнами в пустом пространстве отвечает «скрытым» реакциям излучения, «но механизм такой связи начинает действовать не сразу».

Это означает, что переход в атоме может не совпадать по времени с изменением энергии электромагнитного поля, т. е. нарушается причинность. (В этом разделе Бор применяет свое правило «не выражайся яснее, чем думаешь!».) По мнению Бора, «...закон сохранения импульса, так же как и закон сохранения энергии, мало приспособлен, чтобы с их помощью можно было сделать выводы о природе процессов...». Здесь уже заложены идеи, которые будут развиты в работе Бора, Крамерса и Слэтера, где авторы отказываются от причинности и законов сохранения в единичных актах.

#### 6. Сомнения в законах сохранения и причинности

Во вступлении к работе «Квантовая теория излучения»<sup>28</sup>, написанной Бором совместно с Крамерсом и Слэтером (БКС), авторы утверждают: «...На основе принципа соответствия можно, как мы попытаемся показать в этой работе, прийти к последовательному описанию оптических явлений, связывая скачкообразные процессы, происходящие в атомах, с непрерывным полем излучения, несколько другим способом, чем это обычно делается...».

Чем продиктовано такое желание? Авторам хочется сохранить непрерывность электродинамики, так как они полагают, что только классическая электродинамика может объяснить явления интерференции.

Имеются две возможности: либо электрон излучает при переходе, т. е. одновременно с переходом рождается квант света (законы сохранения и причинность соблюдаются в единичном акте), либо электрон излучает непрерывно, но сохраняет свое состояние, — у него есть только вероятность перехода, которая выбирается так, чтобы в среднем разность энергий электрона равнялась энергии, переданной полю. Авторы выбирают вторую возможность.

Сомнения в законах сохранения и причинности для микрообъектов имеют давнюю историю. Пайс в своей книге приводит письмо Эйнштейна к его другу Лаубу, написанное в 1910 г.: «Сейчас я имею большие надежды на решение радиационной проблемы без квантов...». Впрочем, Эйнштейн сразу же отказался от этой мысли и в следующем письме написал: «Дьявол сыграл со мной дурную шутку...». В 1911 г. он поднимает этот вопрос еще раз на Сольвеевском конгрессе, говоря о двух возможных интерпретациях его формулы для флуктуации черного излучения — либо гипотеза световых квантов, либо отказ от законов сохранения. Эйнштейн отбрасывает вторую возможность: «...У кого хватит смелости на это решиться?..».

В 1916 г. нарушение закона сохранения в единичных актах предполагал Нернст. В 1922 г. Зоммерфельд считал, что самый мягкий способ сохранить

волновую теорию света и квантовые явления — пожертвовать законом сохранения энергии. В 1922 г. эти идеи начали возникать и у Бора.

Свои рассуждения о вероятностях переходов БКС основывают на работе Эйнштейна 1916 г.<sup>21</sup>: «...Такого рода рассмотрение впервые было использовано Эйнштейном, который показал, каким образом может быть получен замечательно простой вывод планковского закона теплового излучения...».

Как мы уже говорили, в этой работе Эйнштейн ввел вероятности индуцированного поглощения и излучения и вероятность спонтанного излучения. По БКС спонтанного излучения нет, переходы вызывает «виртуальное поле излучения». «Атому не обязательно знать, какой переход он совершит позже...». Тем самым авторы отказываются не только от законов сохранения, но и от причинности.

В работе никакой теории не было, речь шла только о предположительном направлении развития квантовой физики. Идея БКС была опровергнута опытом, но эта статья вызвала к жизни работы по проверке причинности и законов сохранения в единичных актах. Уже в 1924 г. Вальтер Боте и Ганс Гейгер с помощью техники совпадений установили, что в комптон-эффекте моменты вылета электрона и вторичного кванта совпадают с точностью  $\Delta t < 10^{-3}$  с, тогда как по БКС корреляции между этими двумя событиями быть не должно. Позже в 1955 г. другими экспериментаторами было получено  $\Delta t < 10^{-11}$  с. Таким образом, эксперимент заставил отказаться от идеи нарушения причинности. В 1925 г. Комптон и Саймон, исследуя комптон-эффект по электронам отдачи в камере Вильсона, подтвердили не только причинность, но и законы сохранения энергии и импульса в единичном акте. В 1936 г. подтверждение законов сохранения энергии и импульса при электрон-позитронной аннигиляции получили Л. А. Арцимович, А. И. Алиханов и А. И. Алиханьян.

Бор с достоинством принял приговор эксперимента. Он писал Фаулеру: «... Наши революционные попытки следует похоронить с максимальным почетом...».

В послесловии к своей статье 1925 г. «О действии атомов при соударениях»<sup>29</sup> Бор пишет: «... Эта связь... навязывает нам корпускулярную картину распространения света...». Таким образом, только в 1925 г. Бор признал существование световых квантов. Он заключает: «... Мы должны быть готовы к тому, что требуемое обобщение классической электродинамики приведет к глубокой ломке найденных до сих пор принципов...».

Теперь Бор был готов к еще более решительному перевороту — предстояло создание новой натурфилософской идеи — концепции дополнительности.

## II. ФИЗИКА И ФИЛОСОФИЯ

Новая квантовая теория привела к гораздо более решительному пересмотру понятий классической физики, чем бурные события 1900, 1905, 1913 гг. Эти события лишь показали непригодность классической механики и электродинамики для описания микромира. Они только обнажили «язвы» классической физики. Вопрос о причинах нарушения классических представлений не ставился. Это были беспрецедентные в истории науки прыжки в неведомое — важнейшие количественные соотношения были найдены почти интуитивно, без ясного представления о том, что сейчас составляет основы теории. Новая квантовая физика поставила задачу выяснения структуры и сути теории, задачу создания философии квантовой физики.

Я начну с анализа главных открытий новой квантовой теории, а затем поясню, что, как мне кажется, следует понимать под словами «философия физики», или, еще уже, — «философия квантовой физики». Только после этого станет понятна уникальная роль Нильса Бора в становлении квантовой теории.

# 1. Новая квантовая теория

Работа де Бройля о волнах материи (1923)<sup>30</sup> была неожиданным, но естественным продолжением работы Эйнштейна 1905 г. о световых квантах с той разницей, что в случае света волновые свойства были обнаружены раньше, чем корпускулярные. Де Бройль показал, что для «волн материи», как и для света, групповая скорость совпадает со скоростью движения частиц.

Догадка де Бройля основывалась на неточной аналогии: волновые свойства света были установлены для классического электромагнитного поля. Они не имеют прямого отношения к волновым свойствам частиц. В первом случае это физические волны, а во втором — вероятностные. Аналогия делается точной только для такой малой интенсивности света, что в явлении участвуют отдельные независимые кванты, поведение которых описывается их волновой функцией. Связь длины волны с импульсом сохраняется, поскольку частота и волновой вектор этой волновой функции совпадают с частотой и волновым вектором соответствующей электромагнитной волны.

В 1925 г. была создана матричная механика. В письме Кронигу (оно приводится в сборнике памяти Паули<sup>31</sup>) Гейзенберг рассказал, как он пришел к матричной механике. По его словам, матричная механика возникла — почти однозначно — из принципа соответствия. Согласно этому принципу, вероятность излучения волны с частотой  $m\nu_0$  пропорциональна квадрату  $m$ -той гармоники в фурье-разложении по времени классического дипольного момента ( $\nu_0$  — классическая частота обращения на высокой орбите). С этой гармоникой Гейзенберг сопоставляет матричный элемент  $d_{n,n'}$ , который соответствует переходу из состояния  $n$  в состояние  $n' = n \pm m$ . Гейзенберг предполагает, что между матричными элементами существуют те же соотношения, что и между компонентами Фурье соответствующих классических величин. Так, в случае осциллятора матричный элемент импульса связан с матричным элементом координаты  $q$  соотношением  $p_{n,n'} = q_{n,n'} = -\omega_0^2 d_{n,n'}$  ( $\omega = 2\pi\nu_0$ ). Так как в фурье-разложении классического движения осциллятора существует только одна гармоника с частотой  $\nu_0$ , то матрицы импульса и координаты содержат лишь околодиагональные элементы. Построив из матриц величину с теми же свойствами, что и скобка Пуассона, легко получить условие коммутации  $pq - qp = \hbar/i$  — в результате возникает система уравнений для определения матриц и собственных значений.

Следующий шаг — уравнение Шрёдингера (1926)<sup>32</sup>, которое возникло как обобщение идеи де Бройля на случай движения во внешнем поле. По словам Дирака<sup>33</sup>, Шрёдингер сначала написал обычное волновое уравнение, содержащее вторую производную по времени от волновой функции, т. е. то, что мы сейчас называем уравнением Клейна — Гордона — Фока. Однако он не решился его опубликовать, возможно, смутившись отрицательными значениями энергий. Переходя к нерелятивистскому пределу, Шрёдингер и получил свое уравнение, которое было прежде всего использовано для определения стационарных орбит и собственных значений энергии атома водорода.

Устойчивые орбиты Бора и правила квантования Бора — Зоммерфельда сразу же получили объяснение. Для того чтобы возникло стационарное решение уравнения Шрёдингера, в существенной области движения должно укладываться целое число волн де Бройля.

Если матричная механика возникла под влиянием идей Бора, то волны де Бройля и волновая механика идут от Эйнштейна. Для Шрёдингера существенным толчком к созданию его уравнения была формула Эйнштейна для флукутаций плотности энергии и плотности частиц в идеальном бозе-газе. Эта формула получается таким же образом, как формула (6), и отличается от нее только другим законом зависимости средней энергии частиц от температуры.



В случае бозе-частиц, в отличие от квантов, неожиданным было волновое слагаемое, которое Эйнштейн, получивший эту формулу сразу после работы де Бройля, объяснял интерференцией «волн материи».

В работе об атоме водорода Шрёдингер пишет<sup>32</sup>: «Эйнштейновская теория газа (идеального бозе-газа. — А. М.) может быть получена из рассмотрения стоячих волн, которые удовлетворяют закону дисперсии де Бройля. Приведенные выше рассуждения об атоме могут рассматриваться как обобщение этих соображений».

Анализ мысленных опытов по интерференции и предположение, что интерференция сохраняется даже для случая, когда поток настолько слаб, что частицы падают на экран независимо одна от другой, заставили прийти к вероятностной интерпретации волновой функции. Если бы волновое поле было физической волной, уже один электрон давал бы всю интерференционную картину. Идея де Бройля о «волне-пилоте» и идея Шрёдингера о реальных «волновых пакетах», описывающих движение частиц, были отброшены в пользу вероятностного толкования (Макс Борн, 1926).

Вероятностное толкование волновой функции было подготовлено работами Нильса Бора 1923—1924 гг. Там идея вероятности применялась к электронным переходам. Эта идея, в свою очередь, пришла из работы Эйнштейна 1916 г.<sup>21</sup>, где он ввел вероятности спонтанного и индуцированного переходов и где впервые появилась мысль о вероятностном описании микрообъектов.

В 1927 г. опыты Дэвиссона, Джермера и Томсона по дифракции электронов на кристаллах подтвердили не только волновую природу электрона, но и выражение для длины волны де Бройля. В этом же году одновременно появилось соотношение неопределенностей Гейзенберга и принцип дополнительности Бора. Соотношение неопределенностей представляет собой конкретное выражение общего принципа дополнительности, о котором мы подробно будем говорить.

Даже после построения математического аппарата квантовой механики потребовались громадные усилия для осмысления полученных результатов. Впервые возникли уравнения для поля вероятности, описывающие поведение не статистической системы, а отдельных частиц.

Физики столкнулись с новыми понятиями, с новым типом познания, с новым толкованием процесса измерения. Возникла необходимость создать философию квантовой теории.

## 2. Ф и л о с о ф и я   ф и з и к и

Если бы Бор ограничился только работами, появившимися до зарождения квантовой механики, то, несмотря на грандиозность сделанного, он вряд ли занял бы место властителя дум квантовой физики. Но в период создания квантовой механики Бор проявил себя как глубокий философ, сыгравший главную роль в понимании новой физики.

Наверное, нужно более точно определить понятие «философ» применительно к Нильсу Бору. Его отношение к профессиональным философам всегда было скептическим. Стефан Розенталь в статье «40 — 50-е годы»<sup>1</sup> пишет: «Постоянным источником огорчений Бора было то, что профессиональные философы, которые, разумеется, должны были бы объединиться в самом прямом смысле слова для изучения важнейших научных проблем, по-видимому, не относились к ним с должным интересом. Бор использовал любую возможность для бесед с датскими и зарубежными философами, но эти беседы, как правило, его не удовлетворяли». Бор говорил о разнице между специалистом и философом: первый стремится узнать как можно больше в узкой области и в результате знает все ни о чем, а второй, желая постичь все, в итоге не знает ничего обо всем...

Бор считал, что философией физики должны заниматься профессиональные физики. И такая конкретная философия совершенно необходима для

развития науки. Именно она создает почву, на которой возникают неожиданные вспышки интуиции.

Все возрастающая специализация науки последних десятилетий привела к тому, что «естественная философия» в целом стала слишком широкой областью для конструктивного исследования методов познания. Этим должны заниматься физики, биологи, психологи..., творчески работающие в своей области. Подобную точку зрения ошибочно называть позитивизмом, поскольку «прикладная философия» не противопоставляется философии вообще, а подготавливает почву для более широких обобщений.

Если проследить под таким углом зрения развитие физики XX века, можно увидеть, что именно прикладная философия давала толчок науке. Один из лучших примеров этого — история создания специальной теории относительности.

Идея о том, что в науке не должно быть понятий, которые не могут быть сформулированы на языке реального или мысленного эксперимента, — принцип наблюдаемости — заставила Эйнштейна подвергнуть сомнению интуитивное понятие одновременности и ввести определение одновременности, проверяемое на опыте.

В популярной статье 1898 г. «Измерение времени»<sup>34</sup> Анри Пуанкаре высказал замечательную мысль об условности определения одновременности. В этой статье нет речи об относительном ходе времени в различных инерциальных системах. Обсуждается только одновременность событий в двух удаленных точках. Пуанкаре заключает: «Одновременность двух событий или порядок их следования, равенство двух длительностей должны определяться таким образом, чтобы формулировка законов природы была настолько простой, насколько это возможно. Другими словами, все эти правила, все эти определения являются лишь плодом неосознанного соглашения».

Какие разные выводы сделали два великих человека — Пуанкаре и Эйнштейн — из одной и той же мысли! Эйнштейн, установив относительность одновременности, заключает, исходя из принципа наблюдаемости, что время течет по-разному в двух разных инерциальных системах. Пуанкаре же принял ньютонову концепцию времени и пространства. Он придерживался конвенционалистической философии, согласно которой в основе математических и естественно-научных теорий лежат произвольные соглашения. Это привело его к мысли об условности утверждений Эйнштейна и к неприятию теории относительности.

Теория, выдвинутая Лоренцом и развитая Пуанкаре, — это не та теория, которую мы называем теорией относительности. У Лоренца и у Пуанкаре, в отличие от Эйнштейна, лоренцево сжатие получается не как неизбежное следствие кинематики, а как результат изменения баланса сил между молекулами твердого тела при движении.

В 1909 г. в Гёттингене Пуанкаре прочел лекцию «Новая механика»<sup>35</sup>. Он перечислил постулаты, принимаемые в его теории: 1) независимость физических законов от выбранной инерциальной системы; 2) скорость материального тела не должна превышать скорости света; и наконец, 3) тела сжимаются вдоль движения. Об этом третьем постулате Пуанкаре говорит: «необходимо принять гораздо более странную гипотезу, противоречащую всему, к чему мы привыкли, тело при движении испытывает деформацию в направлении движения... как ни странно, приходится признать, что эта третья гипотеза превосходно подтверждена...». Как видно из этих слов, сокращение Лоренца с позиции Лоренца — Пуанкаре выглядит удивительным событием, которое почему-то должно выполняться для всех видов сил. Между тем у Эйнштейна оно является прямым следствием его двух постулатов: требования неизменности законов природы при изменении инерциальной системы и постоянства скорости света.

Идея произвольных соглашений вряд ли безоговорочно применима в опытных науках. Системы координат Птолемея и Коперника логически

равноправны, но без «соглашения» Коперника не были бы найдены законы Кеплера и закон тяготения. Можно построить новую механику и на «соглашении» Лоренца — Пуанкаре. Но именно из-за третьего постулата она была бы несравненно сложнее теории относительности. Как мы знаем, приходится выяснять, например, вид сил, обеспечивающих равновесие электрона, вводить «давление Пуанкаре»<sup>36</sup>.

Как без перехода к гелиоцентрической системе не было бы небесной механики, так без «соглашения» Эйнштейна не было бы ни теории тяготения, ни современных теорий поля.

Лоренц и Пуанкаре внесли глубочайший вклад в теорию относительности, но не совершили переворота. После работы Пуанкаре 1898 г. и работы Лоренца 1904 г. оставалось сделать один шаг, но этот шаг требовал другого типа мышления, другой философии. Лоренцу помешала сделать этот шаг его глубокая приверженность философии физики прошлого века. Могучая математическая интуиция Пуанкаре вступила в противоречие с физической интуицией, необходимой для этой задачи. Его математическое прошлое, возможно, и породило слишком гибкую конвенционалистическую теорию познания. В статье «Анри Пуанкаре и физические теории» Луи де Бройль говорит<sup>37</sup>: «... Молодой Альберт Эйнштейн, которому в то время исполнилось лишь 25 лет и математические знания которого не могли идти в сравнение с глубокими познаниями гениального французского ученого, тем не менее, раньше Пуанкаре нашел синтез, сразу снявший все трудности, использовав и обосновав все попытки своих предшественников. Этот решающий удар был нанесен мощным интеллектом, руководимым глубокой интуицией и пониманием природы физической реальности...».

Физика немыслима без математики и математических понятий, но не сводится к ним. Более того, главное в физике — не формулы, а их интерпретация — понимание, именно оно питает интуицию. Физика развивается не с помощью математической логики, а с помощью физической интуиции.

Эти утверждения трудно принять физику математического происхождения, который рассматривает теоретическую физику как раздел прикладной математики. Он удивляется: «Почему вы приписываете главную заслугу в создании теории относительности Эйнштейну, тогда как преобразования Лоренца были получены раньше?» — или «Почему вы приписываете главную роль в понимании квантовой механики Бору, тогда как основное уравнение этой теории получил Шрёдингер (или в матричной форме — Гейзенберг)?».

Мне хотелось бы думать, что эта статья убедит в необходимости различать метод познания физика и математика, различать философии этих двух наук.

Взгляды физиков на взаимоотношение физики и математики время от времени изменяются в зависимости от успехов «интуитивного» или «формального» направлений.

Так, взгляды Бора 1913 г. (см. с. 323) претерпели некоторое изменение после появления матричной механики. В статье «Атомная теория и механика» (1925) он писал:

«Для математиков представляет интерес то обстоятельство, что математические методы, созданные высшей алгеброй, играют существенную роль в формулировке новой квантовой механики. Так, например, общее доказательство теорем сохранения в теории Гейзенберга, данное Борном и Иорданом, основано на применении теории матриц, которая восходит еще ко времени Коши и была особенно развита Эрмитом. Можно надеяться, что началась новая эпоха взаимной стимуляции математики и механики. Физики будут, вероятно, прежде всего сожалеть о том, что в проблемах атомистики мы встречаемся, по-видимому, с ограничением наших общих способов описания. Но это сожаление, надо думать, уступит место благодарности за то, что математика даже в этой области предоставляет нам инструмент для дальнейшего прогресса».

Один из важнейших эвристических принципов, помогающий отыскивать истину в физике, как, впрочем, и в других науках, — понятие красоты теории, закона, концепции. Несмотря на субъективность термина «красота», само понятие достаточно объективно и редко вызывает разногласия в оценках.

Бор сказал о теории элементарных частиц Гейзенберга: «Эта теория недостаточно безумна, чтобы быть правильной». Фраза Бора часто цитируется и приносит немало вреда дилетантам, принимающим нелепость теории за достаточное условие ее ценности. Возможно, словами «недостаточно безумна» Бор хотел сказать, что теория Гейзенберга не предлагает новых методов описания природы. Однако после создания квантовой механики все дальнейшие свершения, несмотря на колоссальные успехи как в физике конденсированных сред, так и в теории элементарных частиц, не изменяли наших методов описания природы. Поэтому, может быть, более естественно предположить, что фраза Бора была продиктована его вежливостью. Более точное утверждение — эта теория не может быть правильной, так как она недостаточно красива.

Философский принцип наблюдаемости и принцип соответствия привели Гейзенберга к созданию матричной механики, в которой присутствуют только наблюдаемые величины — матричные элементы, — и позднее к соотношению неопределенностей.

Громадное влияние на развитие теоретической физики оказала и продолжает оказывать фундаментальная задача — поиски симметрии и единства законов природы. Идея симметрии пронизывает всю современную физику от теории элементарных частиц до теории металлов. Современные попытки построения единых теорий поля — конкретное воплощение философской идеи единства природы.

Много следствий извлекают физики из принципа причинности, содержательность которого следует из того, что он может быть проверен на опыте, как мы видели при обсуждении работы Бора — Крамерса — Слэтера.

Еще одну методологическую идею физики используют так часто, что она кажется почти тривиальной, — принцип соответствия: новая теория должна переходить в старую на границе ее области применимости...

Спор Бора с Эйнштейном, о котором еще пойдет речь, — пример столкновения разных философий. Теория познания Эйнштейна не допускала введения таких категорий, как вероятностное описание действительности. Для Бора же идея дополнительности сделала вероятностную интерпретацию не только естественной, но и необходимой. Между тем именно от Эйнштейна многие теоретики ждали разработки последовательной философии квантовой механики.

Глубокие физические идеи — всегда плод философского осмысления физики. Только после таких разъяснений я решаюсь назвать Нильса Бора философом и утверждать, что его главная роль в создании квантовой теории состояла именно в разработке концепции, которая сделала для физика приемлемой вероятностную интерпретацию квантовой механики.

Философские идеи Бора создали почву, или, говоря точнее, подготовили под сознание физиков, для таких открытий, как матричная механика, соотношение неопределенностей или вероятностное толкование волновой функции.

Вспомним мучительные споры Бора с Гейзенбергом и Шрёдингером, доводившие Гейзенберга до слез, а Шрёдингера до болезни. Обсуждая проблему волн-корпускул, Гейзенберг старался подчеркнуть корпускулярную сторону поведения частиц, а Шрёдингер считал, что все свойства частиц определяются волновой картиной. Бор, по словам Гейзенберга<sup>1</sup>, «...пытался во всем учитывать одновременное существование и корпускулярной, и волновой картин. Он держался убеждения, что лишь обе эти картины совместно могут обеспечить полное описание атомных процессов... Я испытывал неприязнь к такому взгляду на вещи...». В этих спорах уже тогда проявлялась боровская идея дополнительности и рождалась философия квантовой физики.

Особенность такой «прикладной» философии состоит в том, что после решения задачи философская проблема исчезает. Так было и с парадоксом волн-корпускул. После создания квантовой электродинамики, когда стало ясно, что квант света — это порция возбуждения электромагнитной волны, проблема исчезла. Она исчезает всякий раз, когда мы можем ответить на любой разумный вопрос, поставленный экспериментом. В этом одна из причин некоторого пренебрежения философской стороной физики, особенно распространенного среди молодых теоретиков. Другая причина в том, что можно с успехом заниматься теоретической физикой без всякой философии, ограничиваясь разработкой следствий из уже существующих теорий. Такие работы привлекают своей «достоверностью» и «надежностью» и граничат с прикладной математикой. В них не содержится существенных предположений, требующих проверки, но именно поэтому сами по себе подобные работы не приводят к появлению новых теорий. Многие задачи квантовой механики были решены физиками, которых не интересовала логическая структура квантовой теории. Но для открытия, например, формулировки квантовой механики в виде интеграла по путям (Фейнман, 1948) понадобилось более глубокое понимание квантовой теории, философия физики.

Занятие философией физики — дело неблагодарное. О тех, кто подготовил почву и бросил семена, часто забывают, и честь открытия достается тому, кто собирает плоды. Философу физики нужно то редчайшее сочетание глубины мысли, силы убеждения и душевной чистоты, какое было у Нильса Бора.

### 3. Д о п о л н и т е л ь н о с т ь

Бор не любил работать один. Он никогда ничего не писал сам, а всегда диктовал свои мысли либо Маргарет, либо своему секретарю Бетти Шульц, либо ученикам — Паули, Крамерсу, Розенфельду... Ему непременно нужен был слушатель для того, чтобы мысль приобрела законченную форму. Крамерс цитирует Бора: «Мой метод работы заключается в том, что я стараюсь высказать то, чего я, в сущности, высказать не могу, ибо просто не понимаю этого!». Гендрик Казимир писал в статье «Воспоминания о 1929—1931 годах»<sup>1</sup>: «Изучая философские проблемы природы, Бор постоянно совершенствовал искусство получения качественных или полуколичественных результатов без детальных расчетов. Эта форма анализа, благодаря изумительной способности Бора определять порядки величин различных эффектов, характеризовала всю его научную работу».

Стиль мышления Бора лучше всего проявляется в его необычной и неожиданной диалектике.

Приведем несколько его любимых высказываний. Он говорил: «Каждое высказанное мною суждение надо понимать не как утверждение, а как вопрос». Или еще: «Есть два вида истины: тривиальная, которую отрицать нелепо, и глубокая, для которой обратное утверждение — тоже глубокая истина». Это означает, что содержательность утверждения проверяется тем, может ли оно быть опровергнуто.

Дирак в статье «Многогранность личности Бора»<sup>1</sup> говорит об этой мысли более подробно: «При изучении абстрактных философских проблем Бор обращал особое внимание на возможность двойственности толкования, заключенную в самих значениях слов. Эта двойственность может определять истинность или ложность высказывания. Бор считал, что высшая мудрость должна быть обязательно выражена такими словами, смысл которых нельзя определить однозначно. Следовательно, истинность высшей мудрости является не абсолютной, а только относительной в соответствии с одним из значений двусмысленных слов: поэтому противоположное высказывание также правомерно и мудро».

Бор говорил: «Никогда не выражайся яснее, чем ты думаешь». Он любил китайскую поговорку: «Все мы одновременно актеры и зрители драмы жизни», — подобные мысли высказывал и Кьеркегор.

Принцип дополнительности, о котором пойдет речь, — вершина боровской диалектики.

В начале 1927 г. практически одновременно произошли два события. Бор и Гейзенберг после ожесточенных споров на время расстались, а когда встретились, у Гейзенберга был вывод соотношения неопределенностей, а у Бора — продуманный принцип дополнительности. Соотношение неопределенностей было количественным воплощением общей идеи дополнительности, и Бору до получения этого соотношения оставался один шаг. Из его виртуозного обращения с мысленными экспериментами, которое позже проявилось в спорах с Эйнштейном, видно, как легко ему было бы сделать этот шаг. Но по характеру своего мышления Бор мог прийти к конкретным результатам только после философского осмысления.

В статье 1928 г. «Квантовый постулат и новейшее развитие атомной теории»<sup>38</sup> Бор повторяет содержание своего доклада, прочитанного в сентябре 1927 г. на озере Комо во время конференции, посвященной памяти Алессандро Вольты (1745—1827). В начале статьи Бор пишет: «Квантовая теория характеризуется признанием принципиальной ограниченности классических физических представлений в применении к атомным явлениям. [...] Наше обычное описание явлений природы покоится всецело на предположении, что рассматриваемое явление можно наблюдать, не оказывая на него заметного влияния. [...] Согласно квантовому постулату, всякое наблюдение атомных явлений включает такое взаимодействие последних со средствами наблюдения, которым нельзя пренебречь».

Дальше следует, быть может, самое важное: «...Если допустить некоторые взаимодействия с соответствующими, не принадлежащими системе средствами наблюдения, чтобы сделать возможным наблюдение, то однозначное определение состояния системы, естественно, становится уже невозможным, и не может быть речи о причинности в обычном смысле. Следовательно, в соответствии с самой природой квантовой теории мы должны считать пространственно-временное представление и требование причинности, соединение которых характеризует классические теории как дополнительные, но исключающие одна другую черты описания содержания опыта; эти черты символизируют идеализацию возможностей наблюдений и, соответственно, определений. Так же, как теория относительности учит нас, что удобство резкого разделения пространства и времени основано на том, что обычно встречающиеся скорости малы по сравнению со скоростью света, из квантовой теории мы узнаем, что допустимость нашего обычного причинного пространственно-временного описания полностью обусловлена малым значением кванта действия по сравнению с обычными действиями, проявляющимися в ощущениях. В самом деле, при описании атомных явлений квантовый постулат ставит перед нами задачу развития некой «теории дополнительности», об отсутствии противоречий в которой можно судить, только взвешивая возможности определений и наблюдений».

Бор записывает соотношение неопределенностей в форме

$$\Delta E \cdot \Delta \tau = \Delta P_x \cdot \Delta x = \Delta P_y \cdot \Delta y = \Delta P_z \cdot \Delta z = h$$

и говорит: «На релятивистском языке содержание соотношений можно формулировать как утверждение, что, согласно квантовой теории, существует общая взаимная связь между максимальной точностью определения пространственно-временных векторов и, соответственно, векторов энергии-импульса, связанных с объектом. Это обстоятельство может рассматриваться как простое символическое выражение взаимно дополняющей природы пространственно-временного описания и требований причинности».

Затем Бор анализирует вопрос о перенесении границы между объектом и прибором. Он пишет: «В связи с измерением положения частицы можно, например, поставить вопрос: нельзя ли определить импульс, передаваемый при рассеянии, с помощью закона сохранения импульса по измерению изменения импульса, испытываемого микроскопом (вместе с источником света и фотографической пластинкой) во время процесса наблюдения? Однако более подробное исследование показывает, что такое измерение невозможно, если мы одновременно хотим знать с достаточной точностью положение микроскопа».

Очень характерно для Бора стремление изучать проблему во всех проявлениях. Так, обсуждая вопросы перенесения границы между объектом и измерительным прибором, он задавал вопрос: что является органом осязания у слепого, держащего трость, — конец трости или рука? И ответ был таким — если трость держать жестко, ощущение получает ее конец, если слабо — рука.

Первая реакция физиков на теорию дополнительности была сдержанной. Дирак сказал, что, поскольку эта идея не изменяет нашего описания природы, она не кажется содержательной. Только Паули, обычно критически настроенный, принял дополнительность и даже предлагал назвать квантовую механику «теорией дополнительности».

Позже Бор еще много раз обращается к идее дополнительности в популярных статьях и выступлениях.

По словам Розенфельда, «Бор вел огромную и напряженную работу по исследованию применения понятия дополнительности в других областях знаний. Эту задачу он считал не менее существенной, чем чисто физические исследования».

Сводятся ли биологические закономерности к физико-химическим процессам? На первый взгляд все биологические процессы определяются движением частиц, составляющих живую материю. Предельное выражение такой точки зрения — определение физиологии как «физической химии азотсодержащих коллоидов». Но такой взгляд отражает только одну сторону дела. Другая сторона, более важная, — закономерности живой материи, которые хотя и определяются законами физики и химии, но не сводятся к ним. Для биологических процессов характерна финалистическая закономерность, отвечающая на вопрос «зачем?». Физика же интересуется только вопросами «почему?» и «как?». Виталисты считают существенной только биологическую закономерность, отрицая физико-химическую сторону биологических процессов.

Правильное понимание биологии возможно только на основе дополнительности физико-химической причинности и биологической целенаправленности. Понятие дополнительности позволяет строить описание живых процессов на основе взаимодополняющих подходов.

В статье «Свет и жизнь» Бор замечает <sup>39</sup>, «что непрерывный обмен веществ между организмом и окружающей средой необходим для поддержания жизни, вследствие чего четкое выделение организма как физико-химической системы не представляется возможным. Поэтому можно считать, что любая попытка провести резкую грань, позволяющую осуществить исчерпывающий физико-химический анализ, вызовет изменение обмена веществ в несовместимой для жизни организма степени...».

Выступая на Конгрессе по антропологии и этнографии в Копенгагене в 1938 г. с докладом «Философия естествознания и культуры народов» <sup>40</sup>, Бор говорил о дополнительности различных культур: «... Каждая культура представляет собой гармоническое равновесие традиционных условностей, при помощи которых скрытые потенциальные возможности человеческой жизни могут раскрыться так, что обнаружат новые стороны ее безграничного богатства и разнообразия». Бор развил идею равноправия и дополнительности наций в человеческом сообществе.

Бор много размышлял над применением понятия дополнительности в психологии. В том же докладе он говорил: «Мы все знаем старое высказывание, гласящее, что, пытаясь анализировать наши переживания, мы перестаем их испытывать. В этом смысле мы обнаруживаем, что между психологическими опытами для описания которых адекватно употреблять такие слова, как «мысли» и «чувства», существует соотношение дополнительности, подобное тому, какое существует между данными о поведении атомов...».

Непрерывность и скачкообразность физических явлений — понятия дополнительные. Измерения всегда приводят к непрерывным функциям. Скачки, хотя и на малом интервале, но сглажены. В атоме сглаживание определяется конечной шириной спектральных линий, в фазовых переходах — конечностью числа атомов образца. В этом смысле утверждение «природа не делает скачков» правильно. Но вместе с тем такое заглаживание не снимает скачкообразную закономерность, она остается как разумное приближение, точность которого растет по мере исключения сглаживающих явлений.

Физическая картина явления и его математическое описание дополнительные. Создание физической картины требует пренебрежения деталями и уводит от математической точности. И наоборот — попытка точного математического описания явлений затрудняет ясное понимание. На вопрос «Что дополнительно понятию истины?» Бор ответил: «Ясность».

#### 4. Особенности новой квантовой теории

Из принципа дополнительности, вообще, и из боровского толкования процесса измерения, в частности, следуют все непривычные особенности квантовой теории.

Предсказания квантовой механики не дают однозначного ответа, а лишь вероятность того или иного результата. Как бы точно мы ни определяли состояние частицы до ее падения на экран со щелью, нельзя предсказать, в какой именно точке фотопластинки, помещенной за экраном, окажется электрон.

Эта неоднозначность противоречит детерминированности классической физики. Успехи небесной механики в XVII — XVIII веках внушили глубокую веру в возможность однозначных предсказаний. Эту веру выразил Пьер Лаплас: «Разум, который для какого-нибудь данного момента знал бы все силы, действующие в природе, и относительное расположение ее составных частей, если бы он, кроме того, был достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, обнял бы в единой формуле движения самых огромных тел во Вселенной и самого легкого атома; для него не было бы ничего неясного, и будущее, как и прошлое, было бы у него перед глазами...». Лаплас полагал, что зная координаты и скорости всех частиц можно предсказать будущее Вселенной. В такой же мере однозначны и предсказания классической электродинамики.

В квантовой механике неопределенность принципиальна, она следует из дополнительности квантовой природы микрообъектов и классических методов описания. Задать «координаты и скорости всех частиц» невозможно. Самое большее, что можно сделать, — задать в начальный момент волновую функцию. Квантовая механика позволяет однозначно найти волновую функцию в любой более поздний момент. Причинность в лапласовом смысле нарушена, но в более точном квантовомеханическом понимании она соблюдается. Из максимально полно определенного начального состояния однозначно следует единственно возможное конечное состояние. Изменился только смысл слова «состояние».

Главное открытие квантовой механики — вероятностный характер законов микромира.

Вероятное описание физических явлений (статистическая физика) до квантовой механики возникало в сложных системах, где малое изменение начальных условий приводит за достаточно большое время к сильному изме-



нению состояния. Эти системы описываются строго однозначными уравнениями классической механики, и вероятность появляется при усреднении по интервалу начальных состояний.

В противоположность этому, согласно квантовой механике, вероятностное описание справедливо как для сложных, так и для самых простых систем и не требует никакого дополнительного усреднения начальных условий.

Бор всегда подчеркивал, что причина вероятностного описания предсказаний в том, что свойства микроскопических объектов нельзя изучать, отвлекаясь от способа наблюдения. В зависимости от него электрон проявляет себя либо как волна, либо как частица, либо как нечто промежуточное. Разумеется, есть свойства, не зависящие от способа наблюдения: масса, заряд, спин частицы, барионный заряд, магнитный момент... Но всякий раз, когда мы хотим одновременно измерить какие-либо дополнительные друг другу величины, результат будет зависеть от способа наблюдения. Это свойство квантовых объектов В. А. Фок называл «относительностью к средствам наблюдения». Доквантовая физика знала только относительность, связанную с движением, — относительность скорости, относительность формы. В квантовой теории результат измерения зависит от того, как и что измерять в одной и той же системе координат.

Причины этого неустранимы — мы вынуждены описывать квантовые объекты на языке классической физики, на котором говорят наши средства наблюдения и на котором мы формулируем свои мысли. Но так же, как объективность явлений природы не умаляется, а выявляется теорией относительности, относительность к средствам наблюдения в квантовой теории несколько не затрудняет определение объективных свойств микрообъектов.

История развития Вселенной не делается менее объективной от того, что мы описываем ее на нашем человеческом языке. Мы неминуемо, но без потерь пользуемся субъективными инструментами для описания объективного. Гейзенберг в своей книге «Философия физики» цитирует Карла Вейцеккера: «Природа существовала до человека, но человек был до естествознания».

Но слишком частое упоминание слова «наблюдатель» при описании измерений в квантовой механике у многих оставляет неприятное чувство. Можно не говорить о «наблюдателе», а под словом «наблюдение» понимать способ выяснить тот или иной вопрос, сформулированный на классическом языке. Мы как бы узнаем форму многомерного предмета, изучая его трехмерные проекции — рассекая его по разным плоскостям.

Волновая функция — не физическое поле, а поле информации. Из этого вытекают многие особенности квантовой механики. Прежде всего, у частицы не обязательно имеется волновая функция. Чтобы приписать системе волновую функцию, необходимо отобрать состояние, в котором каждый из полного набора коммутирующих операторов, определяющих поведение системы, имеет определенное значение. Это условно формулируется так: над системой должен быть проведен максимально полный опыт. Если же опыт не полон, теория позволяет сделать менее определенные предсказания. В некоторых случаях, например для незамкнутых систем, такая ситуация описывается матрицей плотности.

Соотношение неопределенностей справедливо и в том случае, когда у частицы нет волновой функции. Разумеется, поскольку уравнение Шрёдингера не противоречит этому соотношению, средние квадратичные отклонения канонически сопряженных величин, вычисленные с помощью волновой функции, ему тоже подчиняются. Но физический смысл этого результата совершенно иной, чем у соотношения, полученного Гейзенбергом. Если соотношение Гейзенберга отражает дополненность классических понятий канонически сопряженных величин и относится к любому эксперименту, полному или неполному, то соотношение средних квадратичных отклонений

есть математическое следствие уравнения Шрёдингера и, следовательно, предполагает существование волновой функции.

В квантовой механике выполняется принцип суперпозиции — волновая функция складывается из волновых функций взаимоисключающих событий.

Пусть имеется экран с двумя отверстиями. Попытка уточнить траекторию частицы, отбирая случаи, когда она проходит через одно отверстие, уничтожает интерференцию. Так проявляется дополнительность классического пространственно-временного описания частицы и ее волновых свойств.

Еще одна особенность: после каждого измерения волновая функция изменяется скачком. В самом деле, пусть электрон имеет определенный импульс. В этом состоянии до падения на фотопластинку электрон можно было бы с одинаковой вероятностью найти в любом месте; после почернения зерна пластинки неопределенность его положения за ничтожное время изменилась скачком — теперь она задается размером зерна. Происходит «редукция волновой функции» или «редукция волнового пакета».

Ясно, что никакое физическое поле не может обладать такими свойствами. Из-за конечной скорости распространения света, разумеется, нельзя за короткое время изменить физическое поле в большой области пространства. Скачкообразное изменение волновой функции означает только другой отбор дополнительных условий — в нашем примере мы ищем волновую функцию при условии, что почернело данное зерно. Вот довольно близкая аналогия: представим себе телескоп, быстро переведенный с одной звезды на другую, далекую, — произошел лишь отбор места наблюдения, не связанный ни с какими физическими воздействиями телескопа на звезды или одной звезды на другую.

Я колебался, прежде чем говорить об этих давно установленных истинах, но оказалось, что и сейчас даже в кругу физиков-теоретиков можно встретить искаженное представление о квантовой механике. Недавно возник спор о том, что же самое важное в квантовой механике. Один из спорящих утверждал, что это принцип суперпозиции. Другой активно его поддерживал. Третий упорно повторял, что главное — гильбертово пространство и вектор в нем. Не удалось охладить сторонников суперпозиции примером классической электродинамики, где есть суперпозиция, но нет квантовых явлений. Очевидно, что сначала надо определить, для какой величины мы говорим о суперпозиции или о гильбертовом пространстве...

Правильный ответ дали экспериментаторы: один сказал, что главное — это вероятностное описание, а другой назвал соотношение неопределенностей. И этот последний ответ, может быть, самый общий.

Как мы знаем, из-за нелинейности электродинамики принцип суперпозиции нарушается в сильных полях. Можно представить себе такую квантовую теорию, где этот принцип в некоторых условиях перестанет точно соблюдаться и для волновой функции. Но почти невозможно представить квантовую теорию, в которой нарушалось бы соотношение неопределенностей и вероятностное толкование волновой функции.

После этих предварительных замечаний можно приступить к обсуждению спора Бора с Эйнштейном.

## 5. Спор Бора с Эйнштейном

Бор и Эйнштейн впервые встретились в Берлине весной 1920 г. Эйнштейну был 41 год, Бору — 34. Они давно знали и ценили друг друга. Личная встреча произвела на обоих огромное впечатление. Вскоре после знакомства Эйнштейн писал Бору: «Не часто в моей жизни человеческая личность доставляла мне такую радость самим фактом своего существования...». В это же время он пишет Эрнесту: «Бор был здесь, и, так же как и ты, я совершенно влюблен в него. Он похож на чрезвычайно чувствительного ребенка, пере-



Л. А. Арцимович, И. Д. Рожанский, Н. Бор, И. Е. Тамм, А. П. Александров.  
Москва, май 1961 г. (из архива Отдела теоретической физики им. И. Е. Тамма ФИАН)



Н. Бор, И. Е. Тамм, В. И. Векслер. Москва, май 1961 г. (из архива Отдела теоретической физики им. И. Е. Тамма ФИАН)



Н. Бор и Л. Д. Ландау во время студенческого праздника «Архимед» у главного входа физического факультета МГУ, май 1961 г. (из архива праздника «Архимед»)

мещающегося в этом мире в состоянии некоего транса...». Бор в свою очередь писал Эйнштейну: «Встретить Вас и говорить с Вами было одним из сильнейших переживаний в моей жизни...».

Пайс рассказывает о своей беседе с Элен Дюкас, которая много лет была секретарем Эйнштейна и после его смерти распоряжалась архивом. Она говорила о тесной связи между Бором и Эйнштейном: «Они глубоко и горячо любили друг друга...». Эти отношения продолжались всю их жизнь. Споры не охладили взаимной любви. В 1949 г. Эйнштейн писал по этому поводу: «...По-настоящему можно спорить только с братьями и близкими друзьями; другие слишком чужды друг другу...».

Первые научные разногласия начались (если отвлечься от неприятия Бором идеи световых квантов) с работы Бора — Крамерса — Слэтера 1924 г.<sup>28</sup> Эйнштейн занял резко отрицательную позицию. Мы помним, что у него самого были идеи о нарушении законов сохранения в единичных актах, которые он отбросил после размышлений.

Ирония судьбы состояла в том, что Бор — будущий создатель принципа дополнительности — до 1925 г. старался в своих работах сохранить классическую электродинамику, не понимая, что открытый Эйнштейном в 1905 г. дуализм волн-частиц был первым примером дополнительности. Позже, когда почти все физики приняли вероятностную интерпретацию волновой функции, Эйнштейн отнесся к этому толкованию отрицательно, хотя сам в работе 1916 г.<sup>21</sup> впервые ввел вероятности переходов...

В октябре 1927 г. Бор встретился с Эйнштейном на V Сольвеевском конгрессе, где присутствовали все создатели квантовой механики. Участники конгресса были свидетелями того, как каждый день за завтраком Эйнштейн предлагал Бору очередное доказательство нарушения соотношения неопределенностей в придуманном им опыте. Но вечером того же дня Бор показывал, что при более тщательном рассмотрении соотношение неопределенностей подтверждается.

Они встретились снова в 1930 г. на VI Сольвеевском конгрессе, посвященном магнетизму. Ни тот, ни другой не посещали заседаний, используя все время для разговоров. Эйнштейн считал, что на этот раз нашел безупречный пример нарушения соотношения Бора  $\Delta E \cdot \Delta T \sim h$ . Вот его мысленный эксперимент.

Ящик с излучением помещен на весы. Внутри ящика есть часовой механизм, на короткое время открывающий заслонку, которой прикрыто отверстие в ящике. Часовой механизм фиксирует момент открытия заслонки. Пока отверстие открыто, из ящика вылетает один квант. По разности веса  $m$  ящика до и после вылета определяется энергия кванта  $E = mc^2$ .

На первый взгляд энергия кванта измерена со сколь угодно малой ошибкой  $\Delta E = c^2 \Delta m$ . Уменьшая  $\Delta m$  и определяя по часам момент вылета, мы увидим, что соотношение Бора нарушается.

Бор разъяснил недоразумение на следующее утро. Я приведу его доказательство, так как это самый поучительный из мысленных экспериментов, предложенных Эйнштейном, и еще более поучительно разъяснение Бора, показывающее стиль его рассуждений.

Пусть ящик подвешен на пружине и скреплен со стрелкой, которая перемещается по шкале. Импульс, передаваемый силой тяжести ящику за время взвешивания  $T$ , равен  $p = Tgm$ , где  $g$  — ускорение силы тяжести. Классическая ошибка  $\Delta_1 p$  в определении этой величины, вызванная неточностью измерения массы, равна  $\Delta_1 p = Tg \Delta m$ . Для того чтобы показания весов были достаточно определенными, квантовая неопределенность  $\Delta p = h/\Delta q$ , где  $\Delta q$  — неопределенность координаты ящика, — должна быть меньше, чем классическая ошибка  $\Delta_1 p$ . Итак,  $Tg \Delta m > \Delta p = h/\Delta q$ . Но согласно общей теории относительности, часы, смещаясь в направлении силы тяжести на расстояние  $\Delta q$ , изменяют свой ход на величину  $\Delta T$ , причем  $\Delta T/T = g \Delta q/c^2$ .

Из этих соотношений получаем

$$c^2 \Delta m \cdot \Delta T \sim \hbar.$$

Неопределенность энергии связана с неопределенностью момента вылета соотношением Бора. Бор победил Эйнштейна его же оружием — используя теорию тяготения.

Присутствовавший при всех спорах Эренфест, бывший близкий друг обоих, сказал Эйнштейну: «Мне стыдно за тебя, Эйнштейн: ты оспариваешь новую квантовую теорию совершенно так же, как это делали с теорией относительности твои враги!».

Несмотря на любовь и взаимное уважение, споры были бескомпромиссными. Когда Эйнштейн в духе своей философии предложил: «Давайте твердо зафиксируем сначала то, что в ваших представлениях я могу принять с моей точки зрения, и, отправляясь от этой базы, будем логически рассуждать дальше», Бор ответил в своем стиле: «Я считал бы предательством по отношению к науке, если бы согласился зафиксировать твердо что-либо в этой новой области, где все еще не ясно...». Через много лет Эйнштейн говорил, что Бор всегда высказывал свои суждения не как человек, познавший истину, но как вечно ищущий ее.

Даже когда Эйнштейн в конце концов почувствовал, что не может найти слабого места в принципе неопределенности и в логике квантовой механики, он заявил, что эта вполне последовательная точка зрения противоречит его физической интуиции и, по его убеждению, не может быть окончательным решением: «... господь бог не играет в кости...».

В 1935 г. затихший спор разгорелся снова — появилась работа Эйнштейна, Подольского и Розена «Может ли квантовомеханическое описание физической реальности считаться полным?»<sup>41</sup>. Допустим, что две подсистемы некоторое время взаимодействовали, а потом разошлись на далекое расстояние. Авторы замечают: «... Поскольку эти системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций на первой системе, во второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений». Между тем, согласно квантовой механике, с помощью измерений в первой системе можно изменить волновую функцию второй системы...

Проследим это явление на совсем простом примере, где оно делается тривиальным. Допустим, мы знаем импульсы двух частиц до столкновения, и пусть после столкновения одна остается на Земле, а другая летит на Луну. Если земной наблюдатель получит определенное значение импульса оставшейся частицы, он по закону сохранения импульса может рассчитать импульс частицы на Луне. Следовательно, волновая функция этой частицы в результате измерения на Земле определится, она соответствует определенному импульсу.

Если понимать волновую функцию как физическое поле, то это совершенная бессмыслица. Если же учесть, что волновая функция — волна информации, результат естествен: это обычное изменение вероятности предсказаний с появлением новой информации. Мы задаем вопрос: какова вероятность, что лунный экспериментатор найдет то или иное значение импульса при дополнительном условии, что на Земле найден импульс другой частицы? Это означает, что нужно взять весь набор многократных измерений импульса в обеих лабораториях и отобрать из этого набора те случаи, когда на Земле получился заданный импульс. При этом условии лунные измерения будут давать определенный и известный импульс, согласно закону сохранения импульса. Влияние измерений в одной подсистеме на предсказания о поведении другой подсистемы нужно понимать именно в смысле отбора случаев, соответствующих определенному условию. Разные дополнительные условия заставляют нас отбирать разную последовательность событий. Понятно, что при изменении условий отбора волновая функция изменяется.

Две подсистемы, находящиеся на больших расстояниях, физически никак не связаны, независимы, но условная вероятность, конечно, зависит от того, какое состояние одной из подсистем мы отбираем. Это явление есть и в классической физике, и даже в повседневной жизни. Предсказание скачком изменяется при изменении условий отбора событий.

В сборник, посвященный 70-летию Эйнштейна, Бор прислал статью «Дискуссии с Эйнштейном о теоретико-познавательных проблемах в атомной физике»<sup>42</sup>. В ней подробно разбираются возражения Эйнштейна и ответы на них Бора. В заключение Бор пишет: «Дискуссии с Эйнштейном, составляющие тему настоящей статьи, продолжались в течение многих лет, принесших атомной физике огромные успехи. Были ли наши действительные встречи короткими или длинными, они всегда производили на меня глубокое и продолжительное впечатление, и, когда я писал эту статью, я, так сказать, все время спорил с Эйнштейном, даже тогда, когда касался предметов, казалось бы, далеких от специальных проблем, рассматривавшихся в наших встречах...».

По существу, это был спор двух философий, двух теорий познания — ясного взгляда старой физики, возвращенного на классической механике и электродинамике с их однозначной детерминированностью, и более гибкой философии, вобравшей в себя новые факты квантовой физики XX века и вооруженной принципом дополнительности.

Нужно ли искать другую интерпретацию квантовой механики? Квантовая механика вместе с теорией измерений представляет собой непротиворечивую и необыкновенно красивую теорию. Все попытки ее «усовершенствовать» пока оказывались несостоятельными и, в лучшем случае, ограничивались вопросом: как менее красиво и более сложно получить уже известные результаты квантовой механики?...

В результате бурных споров о полноте квантово-механического описания возникла идея: не объясняется ли неопределенность в поведении электрона тем, что его состояние зависит не только от импульса, координаты и проекции спина, но еще от каких-то внутренних скрытых параметров? Тогда неопределенность результата, как и в статистической физике, возникнет от произвола в значениях этих параметров. В принципе, если бы скрытые параметры можно было определить, предсказания сделались бы определенными, как в классической механике.

Конечно, это очень неуклюжий и неприятный способ — спасти детерминизм, вводя лишние переменные. Тем более, что поначалу удавалось только подтверждать уже известные квантовомеханические соотношения.

Для единичного измерения игрой скрытых параметров удавалось получить совпадение с квантовой механикой. Однако при повторных измерениях это не всегда возможно. Первое измерение так ограничивает область значений скрытых параметров, что их свободы ко второму измерению уже недостаточно для согласия с квантовой механикой. Наиболее убедительно это показал Джон Белл в 1965 г.<sup>43</sup> Для доказательства ему достаточно было предположить, что значения скрытых параметров в разделенных системах независимы. Но ведь эти параметры для того только и вводились, чтобы избежать вероятностной «зависимости» разделенных объектов, предписываемой квантовой механикой...

Итак, Белл показал, при каких экспериментах можно увидеть различие между предсказаниями квантовой механики и теории скрытых переменных. Такой опыт был выполнен в 1972 г. Стюартом Фридманом и Джоном Клаузером<sup>44</sup>. Они наблюдали свет, испускаемый возбужденными атомами кальция. В условиях их эксперимента атом кальция испускал последовательно два кванта видимого света, которые можно было отличить с помощью обычных цветowych фильтров. Каждый квант попадал в свой счетчик, проходя через поляриметр, который отбирал определенное направление поляризации. Изучалось число совпадений счетчиков как функция угла между направле-

ниями поляризации двух квантов. Теория скрытых переменных предсказывала провалы на кривой, изображающей эту зависимость. На опыте не только не оказалось никаких провалов, но вся экспериментальная кривая в точности совпала с теоретической кривой, полученной из квантовой механики. Позже были поставлены другие более точные опыты, которые тоже согласовались с квантовой механикой.

Итак, теория скрытых параметров по крайней мере в ее теперешнем виде противоречит опыту. Квантовая механика лишняя раз подтвердилась. Но, вместе с тем, утверждение о неизбежности квантовой механики, особенно, когда речь идет о неизведанной области сверхмалых масштабов, противоречило бы духу философии Бора.

### ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Новая физика требовала нового типа мышления и нового стиля работы. В классической физике, начиная с Ньютона, глубокие и ясные физические идеи предшествовали законченной теории. Создатели квантовой теории двинулись вперед без прочных оснований, через смутные догадки, которые постепенно уточнялись.

Важнейшие количественные результаты получались прежде, чем приходило их физическое осмысление. Понимание возникало по мере продвижения вперед.

Еще одна характерная черта нового стиля — непрестанное широкое обсуждение всех возникающих неясностей и догадок. Это было как раз то, чего не любил Эйнштейн. Бор сказал по этому поводу: «Квантовой теории необходимо было обсуждение, а он привык все делать сам...».

Этому новому подходу как нельзя более соответствовал тип мышления и стиль работы Нильса Бора.

Нельзя не восхищаться Нильсом Бором — Гражданином Земли. Он прилагал громадные усилия для объединения международного научного сообщества. Реальным воплощением этих усилий стал с первых дней своего существования Институт Бора на Блегдамсвей, где работали физики многих стран, где они находили убежище в тяжелые для мира времена.

Многие немецкие физики вынуждены были эмигрировать из Германии. Иные стали конформистами — смирились с фашизмом как с неизбежным злом. Я спросил Бора, что он думает о книге Юнга «Ярче тысячи солнц»<sup>45</sup>, в которой описан приезд Гейзенберга в Копенгаген и его встреча с Бором в октябре 1941 г. Юнг пишет, что Бор не понял Гейзенберга и их отношения охладились. Но Бор сказал: «В этом рассказе нет и тени правды. Я понял его отлично. Он предлагал мне сотрудничать с нацистами...». Я почувствовал, что удивительно мягкий и деликатный Бор становится непреклонным и даже жестким, когда речь заходит о принципах.

Еще до Хиросимы Бор обращался к правительствам США и Великобритании, посылая меморандумы, перелетал океан во время войны на военных самолетах, добываясь личных встреч, чтобы убедить Черчилля и Рузвельта в опасности ядерного оружия. К стыду Черчилля, он не понял, или не захотел понять, что активность Бора вызвана только страхом за судьбу человечества, и лишь вмешательство нескольких физиков уберегло Бора от ареста по обвинению в шпионаже.

В своем «Открытом письме Организации Объединенных Наций» в 1950 г.<sup>46</sup> он говорит о необходимости полного рассекречивания всех работ по ядерной физике и использования ядерной энергии только в мирных целях. Письмо заканчивается словами:

«Потребуется усилия всех сторонников международного сотрудничества, как отдельных лиц, так и целых народов, чтобы создать во всех странах мнение, выражающее со все большей определенностью и силой требование открытого мира».



Нильс Бор был гармоничной личностью. Ему удалось выразить себя во всех человеческих проявлениях, и он сделал больше, чем может сделать человек. Он вправе был бы сказать о себе словами Гёльдерлина: «...Чего еще желать мне, если, как боги, я жил однажды!».

Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау,  
Черноголовка (Московская обл.)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нильс Бор. Жизнь и творчество: Сборник статей.— М.: Наука, 1967.
2. Pais A. *Subtle is the Lord...* — Oxford: Oxford Univ. Press, 1982.
3. Данин Д. С. Нильс Бор.— М.: Мол. гвардия, 1978.— (Сер. «Жизнь замечательных людей»).
4. Kierkegaard S. *Gesammelte Werke*.— Düsseldorf, Köln, 1951, 1952.
5. Bohr N.— *Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A*, 1909, v. 209, p. 281; перевод: Бор Н. Избранные научные труды [далее — БИНТ].— М.: Наука, 1971, т. I, с. 7.
6. Bohr N. *Studies over metallerners electron teori: Dissertation*.— København, 1911.
7. Bohr N.— *Nature*, 1937, v. 140, p. 752; перевод: БИНТ, т. II, с. 247.
8. Bohr N.— *Phil. Mag.*, 1913, v. 25, p. 10; перевод: БИНТ, т. I, с. 63.
9. Bohr N.— *Ibidem*, 1915, v. 30, p. 581; перевод: БИНТ, т. I, с. 215.
10. Planck M. *Ann. d. Phys.*, 1900, Bd. 1, S. 69; перевод: Планк М. Избранные научные труды [далее — ПЛИНТ].— М.: Наука, 1975, с. 191.
11. Rayleigh J.— *Phil. Mag.*, 1900, v. 49, p. 539.
12. Planck M.— *Verhandl. Dtsch. phys. Ges.*, 1900, Bd. 2, S. a) 202, б) 237; перевод: ПЛИНТ, с. а) 249, б) 251.
13. Einstein A.— *Ann. d. Phys.*, 1906, Bd. 20, S. 199; перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов [далее — ЭСНТ].— М.: Наука, 1966, т. III, с. 128.
14. Einstein A.— *Ibidem*, 1907, Bd. 22, S. 180; перевод: ЭСНТ, т. III, с. 134.
15. Debye P.— *Ibidem*, 1912, Bd. 39, S. 789.
16. Einstein A.— *Ibidem*, 1905, Bd. 17, S. 132; перевод: ЭСНТ, т. III, с. 92.
17. Бор Н. Лекции по атомной механике.— Киев: ГНТИ, 1934, т. 1.
18. Einstein A.— *Phys. Zs.*, 1909, Bd. 10, S. 185; перевод: ЭСНТ, т. III, с. 164.
19. Einstein A.— *Ann. d. Phys.*, 1904, Bd. 14, S. 351; перевод: ЭСНТ, т. III, с. 67.
20. Einstein A.— *Phys. Zs.* 1909, Bd. 10, S. 827; перевод: ЭСНТ, т. III, с. 181.
21. Einstein A.— *Mitt. Phys. Ges. (Zürich)*, 1916, Nr. 18, S. 47; перевод: ЭСНТ, т. III, с. 393.
22. Nickolson J.— *Mon. Not. RAS*, 1912, v. 72, p. 49, 139, 677, 693, 729.
23. Bohr N.— *Phil. Mag.*, 1913, v. 26, p. 1 (pt. I), 476 (pt. II), 857 (pt. III); перевод: БИНТ, т. I, с. 84.
24. Bohr N.— *Nature*, 1913, v. 92, p. 231; перевод: БИНТ, т. I, с. 149.
25. Bohr N. *On Atomers bygning: Nobelforedarad*.— In: *Les Prix Nobel en 1921/1922*.— Stockholm, 1923.
26. Bohr N.— *Kgl. Danske Vid. Selsk. Skr. Naturvid. og Math. Afd.*, 1918, Bd. 4, rackke 8, Nr. 1, S. 1, 37.
27. Bohr N.— *Zs. Phys.*, 1923, Bd. 13, S. 117; перевод: БИНТ, т. I, с. 482.
28. Bohr N., Kramers H., Slater J.— *Phil. Mag.*, 1924, v. 47, p. 785; перевод: БИНТ, т. I, с. 526.
29. Bohr N.— *Zs. Phys.*, 1925, Bd 34, S. 142; перевод: БИНТ, т. I, с. 549.
30. Broglie L., de.— *C.R. Ac. Sci.*, 1923, t. 177, p. 507, 548.
31. Теоретическая физика 20 века.— М.: ИЛ, 1962, с. 34.
32. Schrödinger E.— *Ann. d. Phys.*, 1926, Bd 79, S. 361.
33. Dirac P. A. M.— In: *The Unity of the Fundamental Interactions*/Ed. Zichichi.— N.Y., 1983.
34. Poincaré H.— *Rev. Metaphys. et Morale*, 1898, t. 6, p. 1; перевод: Пуанкаре А. Избранные научные труды [далее — ПИНТ].— М.: Наука, 1974, т. III, с. 419.
35. Poincaré H. *Secks Vorträge aus der reinen Mathematik und mathematischen Physik*.— Leipzig: Teubner, 1910.
36. Poincaré H.— *Rend. Circ. Mat. Palermo*, 1906, v. 21, p. 129; перевод: ПИНТ, т. III, с. 433.
37. Broglie L., de. *Savant et deconvert G.*— Paris: Albin Michel, 1951, p. 45.
38. Bohr N.— In: *Atti del Congresso Internazionale dei fisici Como*, 1927.— Pavia; Roma, 1927, v. II, p. 565; перевод: БИНТ, т. II, с. 30.
39. Bohr N. *Light and Life*.— In: *Comptes rendus du 2<sup>e</sup> Congress International de la lumier.*— Copenhagen, 1932; перевод: БИНТ, т. II, с. 111.
40. Bohr N. *Natural Philosophy and Human Cultures*.— In: *Comptes rendus du Congress International de Science de la Antropologie et Etnologie*.— Copenhagen, 1938; перевод: Бор Н. Атомная физика и человеческое познание.— М.: ИЛ, 1961, с. 39.

41. Einstein A., Podolsky B., Rosen N.— Phys. Rev., 1935, v. 47, p. 777;  
перевод: ЭСНТ, т. III, с. 604.
42. Bohr N.— In: Albert Einstein — Philosopher-Scientist.— Evanston, 1949, p. 201;  
перевод: БИИТ, т. II, с. 399.
43. Bell J.— Physics, 1965, v. 1, p. 195; Rev. Mod. Phys., 1966, v. 38, p. 447;  
Гриб А. А.— УФН, 1984, т. 142, с. 619.
44. Freedman S., Clauser J.— Phys. Rev. Lett., 1972, v. 28, p. 938.
45. Юнг Р. Ярче тысячи солнц: Повесть об ученых-атомщиках.— М.: Атомиздат, 1960.
46. Bohr N. Open Letter to the United Nations.— Copenhagen, 1950; также: Science, 1950, v. 112 No. 2897, p. 1; перевод: Бор Н.— УФН, 1985, т. 147, вып. 2, с. 357  
(в этом номере).