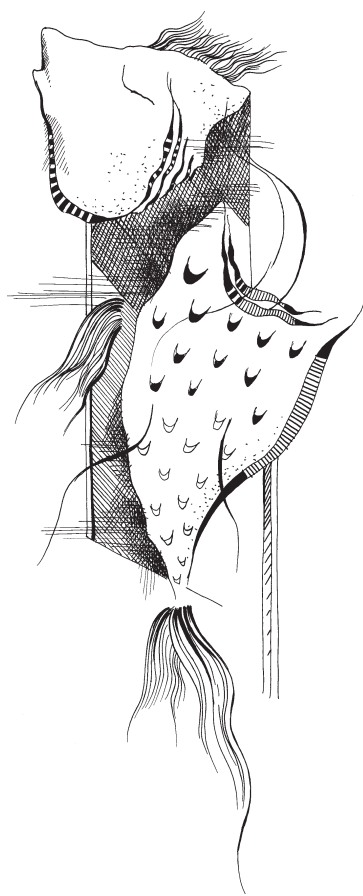


Идеи



*Между идеей
И повседневностью,
Между помыслом
И поступком
Падает Тень...*

*Между зачатием
И рождением,
Между движением
И ответом
Падает Тень...*

*Между влечением
И содроганием,
Между возможностью
И реальностью,
Между сущностью
И проявлением
Падает Тень...*

*Томас Стернз Элиот
(Перевод А.Сергеева)*



Ганеша, Индия

Глава шестая

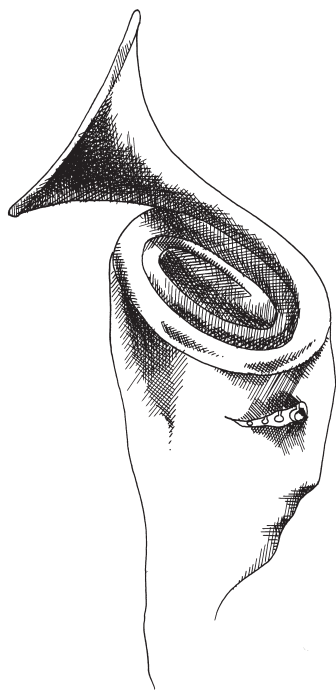
Теория Бора глазами современников
Явление, образ, понятие, формула
Матричная механика Гейзенберга

Вокруг кванта
Фундамент физики

Значения слов определяются традицией и привычкой, но их истинный смысл выясняется только в контексте. Так происходит всегда: в науке и искусстве, в технике и политике. Узнавая новые явления, человек называет их старыми словами, но вкладывает в них новый смысл; смысл, который нельзя понять, если не знать происхождения новых понятий и их связей с прежними. Это стремление хоть как-то отделить нужное значение слов от привычного объясняет появление жаргона в науке, который, как правило, противоречит нормам литературного языка. Дилетанты от науки впадают в другую крайность: они воспринимают все её утверждения буквально, не зная той сложной системы условностей, которыми окружена словесная формулировка любого научного результата. Сплошь и рядом из-за этого возникают недоразумения — забавные для физиков, огорчительные для самих дилетантов.

В конце XIX — в начале XX века физики открыли новый мир — мир атома. Их ошеломило богатство новых явлений, они наскоро придумали им названия, но не вполне понимали, какой смысл в них надо вкладывать. Когда Бор впервые произнёс слова «стационарное состояние» и «квантовый скачок», вряд ли кто, включая и его самого, мог объяснить, что же они, в сущности, означают.

Рассказ о квантовой физике мы начали с определения: *квантовая физика — это наука о строении и свойствах квантовых объектов и явлений*. Сразу же выяснилось, что мы не вполне понимаем, что означают слова «квантовый объект», одним из которых является и атом. Вполне однозначно понятие «атом» мы не можем определить и сейчас, хотя знаем о нём гораздо больше, чем вначале. Под влиянием опытов умозрительные образы сменялись более сложными, менее нагляд-



ными, но зато и более адекватными представлениями об атоме. Учёные постепенно доказали, что атом действительно существует, но мало похож на атом Демокрита. Узнали, что он состоит из ядра и электронов. Выяснили, что он может испускать электромагнитные волны. Установили, что его излучение связано с движением электронов в атоме. Необходимо было найти законы этого движения. И тогда изобрели квантовую механику.

Начал создавать её Нильс Бор: его постулаты, хотя и противоречили духу и традициям всей прежней физики, внесли неожиданный порядок в первозданный

хаос опытных фактов. Но наука ничего не принимает на веру — даже если это постулаты Бора. Надо было либо отбросить их, либо устранить их противоречия.

Теория Бора глазами современников

В 1949 г. Эйнштейн вспоминал об эпохе создания квантовой механики: «Все мои попытки приспособить теоретические основы физики к новым результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля и нигде не видно было твёрдой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору, человеку с гениальной интуицией и тонким чутьём, найти главнейшие законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это мне кажется чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли».

«Пусть это безумие, но в нём есть метод», — цитировал юный Гейзенберг, говоря о постулатах Бора в 1920 г. Сорок лет спустя он писал по-другому: «Язык образов Бора — это язык поэзии, который лишь отчасти имеет отношение к изображаемой им действительности и который нельзя никогда понимать буквально... Постулаты Бора подобны кисти и краскам, которые сами по себе ещё не составляют картины, но с их помощью можно её создать».

Издали всегда много легче и надёжнее оценивать значение открытий. Современникам гораздо труднее: они ещё слишком мало знают, чтобы отличить достоинства теории от её недостатков. Современники Бора, несмотря на все успехи его гипотезы, были глубоко неудовлетворены. То, что они писали и говорили в то время, для нас непривычно и поучительно.

«Если это правильно, то это означает конец физики как науки» (А. Эйнштейн, 1913 г.).

«Я убеждён, что это учение является роковым для здорового развития науки» (А. Шустер, 1913 г.).

«Атом существует вечно, мы это бесспорно знаем. Но понимаем ли мы это? Нет, не понимаем. Наше непонимание мы прикрываем непонятными же квантовыми условиями. Процесс лучеиспускания — это акт возрождения разрушенного атома. Механизм его нам непонятен. Своё непонимание мы вновь прикрываем непонятным квантовым условием, второй гипотезой Бора... Весь этот метод Бора основан на квантовании — совершенно слепом, мало логическом процессе мысли, на формальной, если можно так выразиться, интуиции» (Д.С. Рождественский, 1919 г.).

«Теория квантов подобна другим победам в науке: месяцами вы улыбаетесь им, а затем годами плачете» (Г. Крамерс, 1920 г.).

«Законы квантования в своей теперешней формулировке носят до некоторой степени теологический характер, для натуралиста совершенно неприемлемый, так что многие учёные по справедливости возмущаются этими *Bauern-Regeln* (крестьянскими законами)» (П. Эпштейн, 1922 г.).

«Мы неизмеримо далеки от такого описания атомного механизма, которое позволило бы проследить, например, все движения электрона в атоме или понять роль стационарных состояний... Теорию квантов можно сравнить с лекарством, излечивающим болезнь, но убивающим больного» (Г. Крамерс, 1923 г.).

«Всё это очень красиво и крайне важно, но, к сожалению, не очень понятно. Мы не понимаем ни гипотезы Планка об осцилляторах, ни запрета нестационарных орбит, и мы не понимаем, как же,

в конце концов, образуется свет согласно теории Бора. Не подлежит сомнению, что механику квантов, механику дискретного, ещё предстоит создать» (Г.А. Лоренц, 1923 г.).

«Физика теперь снова зашла в тупик, во всяком случае для меня она слишком трудна, и я предпочёл бы быть комиком в кино или кем-нибудь вроде этого и не слышать ничего о физике!» (В.Паули — Р. Кронигу, 21 мая 1925 г.). В конце письма Паули добавил: «Я очень надеюсь, что новые идеи Бора спасут нас. Я умоляю его сделать это как можно быстрее». Но и у самого Бора тогдашнее положение теории вызывало «чувство грусти и безнадёжности».

Отто Штерн вспоминал много лет спустя, что в то время они с Лауэ поклялись оставить занятия физикой, если «в этой боровской бессмыслице хоть что-то есть». А Лоренц сетовал, что не умер пятью годами ранее, когда в физике ещё сохранялась относительная ясность.

Это единодушное недовольство трудно понять тем, кто совсем не знаком со структурой и методологией физики, и, чтобы осознать его причину, надо хотя бы в общих чертах представлять себе внутреннюю логику естественных наук.

В учебнике квантовой механики человека неискущённого прежде всего поражает обилие формул и уравнений. Довольно скоро он убеждается, что это необходимая, но не самая трудная часть науки об атоме. Гораздо сложнее понять, что скрывается за формулами, или, как принято говорить, «понять физический смысл формул». Трудности эти не следует преувеличивать, но, поскольку они всё-таки реально существуют, помнить о них полезно. Их суть в том, что многие слова, привычные нам с детства, в квантовой механике мы вынуждены использовать в необычном смысле.

Явление, образ, понятие, формула

Познание природы начинается с ощущений: ребёнок трогает рукой деревянную лошадь, слушает голос матери, сосёт соску — словом, с первых дней жизни он попадает в мир *явлений*, которые рожают у него свои *образы*. Для этих явлений и образов у него нет пока даже названий — лишь постепенно ребёнок начинает узнавать слова, им соответствующие. Некоторое время спустя он догадывается, что одни и те же слова рожают у разных людей различные образы, и, наконец, выясняет, что существуют слова (или группы слов), которые не связаны непосредственно с образами, хотя и появились благодаря им. Это *понятия*.

Понятия обобщают коллективный опыт, они лишены деталей, присущих конкретным образам, и поэтому пригодны для общения разных людей между собой.

Однако и понятия не вполне однозначны — хотя бы потому, что могут вызвать у разных людей различные образы. Даже в повседневной жизни это часто приводит к недоразумениям. В науке это ещё опаснее: её результаты претендуют на объективный смысл, который не должен зависеть от капризов воображения или непостоянства человеческих мнений. Поэтому в науке почти каждому понятию поставлена в соответствие *формула* — набор символов и чисел — и заданы правила действий над ними. Этим достигается та однозначность науки, которая позволяет общаться между собой учёным разных стран и поколений.

Связь

явление → образ → понятие → формула

можно пояснить на примере возникновения понятия «волна».

Люди наблюдали различные явления: волны на море и круги от брошенного в пруд камня, распространение света и ко-

лебания струн. У них при этом возникали вполне конкретные образы. Постепенно им стало ясно, что этим разным явлениям присуще нечто общее: все они связаны с некоторым *периодическим процессом*, характерные признаки которого — явления интерференции и дифракции. Так в физике возникло понятие *волна*. А чтобы сделать его вполне однозначным, с ним связали четыре характеристики: амплитуду A , скорость распространения v , длину волны λ и частоту ν .

Точно так же понятие *частица* не предполагает, что у вас при этом возникает конкретный образ песчинки или макового зёрнышка. Физику вполне достаточно знать, что частица — это некий объект, внутренним строением которого он не интересуется, важно только, что у него есть масса m , скорость v , импульс $p = mv$ и траектория движения, которую физик может проследить.

Траектория — ещё одно понятие, которое необходимо использовать, определяя движение частицы. На первый взгляд, процесс этот беспределен: чтобы определить понятие, нужно использовать другое, а его, в свою очередь, тоже определять и т.д. Однако это не так. В физике существует несколько первичных понятий, которые можно определить без ссылок на другие, а именно задав точные рецепты измерения величин, этим понятиям соответствующих. Таковы понятия: время t , координата x , заряд e .

Траектория движения частицы $x(t)$ задана, если в каждый момент времени t мы можем указать её координату x . Для этого нужно либо измерить координаты x_i в моменты времени t_i , либо вычислить их. Первую задачу решает экспериментальная физика, вторую — теоретическая, причём вторую задачу можно решить лишь в том случае, если известны физические законы, по которым частица движется.

Физический закон — это постоянная связь явлений и соответствующих им величин, записанная с помощью математических символов в виде уравнений. Для каждой группы явлений существуют свои законы движения: в механике — одни законы (уравнения Ньютона), в электродинамике — другие (уравнения Максвелла). А всё вместе, взятое в совокупности, — понятия, физические законы, формулы, их выражающие, и следствия из них — принято называть точной наукой.

Каждая законченная наука должна быть логически непротиворечивой. Это означает, в частности, что каждое понятие в рамках этой науки можно употреблять только в одном, строго определённом смысле. Добиться этого трудно, но необходимо, поскольку учёные, как и все люди, общаются между собой не формулами, а с помощью слов. Формулы нужны им для однозначной записи результатов исследований.

Примером логически завершённой науки долгое время служила механика, которую теперь называют классической. Механика — это наука о движении тел. Её законам подчиняются почти все видимые движения в природе — будь то порхание мотылька или полёт ракеты. Классическое совершенство механики долгое время гипнотизировало учёных, и они пытались объяснить с её помощью не только механические, но и все другие явления природы.

Движение — одно из самых сложных понятий физики. С ним воображение вольно связывает самые разные образы — от шелеста листьев до бегущего носорога. Однако даже самые фантастические картины движения содержат нечто общее: перемещение одних объектов относительно других с течением времени. После введения понятия траектории понятие движения становится более определённым,

вероятно потому, что при этом оно вновь приобретает черты наглядности. Условия развития и воспитания человека таковы, что ему трудно вообразить иное движение кроме механического, поэтому и все другие движения он пытается осмыслить также с помощью понятия траектории. Это ему, естественно, не удаётся, например при попытке осмыслить электрические движения. Можно, конечно, представить себе высоковольтную линию передач или междугородний телефон и вообразить, что провода и есть «траектория» электрических сигналов, однако реального смысла такие образы не имеют: электромагнитные волны — это не жидкость, текущая по проводам.

Определить понятие движения в квантовой механике ещё сложнее. Более того, именно тот день, когда его удалось определить непротиворечиво, можно считать днём рождения современной квантовой механики.

Матричная механика Гейзенберга

Когда прошёл восторг первых успехов теории Бора, все вдруг трезво осознали простую истину: схема Бора противоречива. От этого факта некуда было укрыться, и им объясняется тогдашний пессимизм Эйнштейна, равно как и отчаяние Паули. Физики вновь и вновь убеждались, что электрон при движении в атоме не подчиняется законам электродинамики: он не падает на ядро и даже не излучает, если атом не возбуждён. Всё это было настолько необычно, что не укладывалось в голову: электрон, который «произошёл» от электродинамики, вдруг вышел из-под контроля её законов. При любой попытке найти логический выход из этого порочного круга учёные всегда приходили к выводу: атом Бора существовать не может. Однако природе нет дела до наших

логических построений: атомы устойчивы вопреки всякой логике и, насколько мы знаем, существуют вечно. А если законы электродинамики не могут объяснить устойчивости атома — тем хуже для них, значит, движение электрона в атоме подчиняется каким-то другим законам. Впоследствии оказалось, что постулаты Бора — это удачная догадка о тогда ещё неизвестных, но фундаментальных законах, которые чуть позже назовут законами квантовой механики.

Квантовая механика — это наука о движении электронов в атоме. Она первоначально так и называлась: атомная механика. А Вернер Карл Гейзенберг (1901—1976) — первый из тех, кому выпало счастье эту науку создавать.

Весной 1925 г. по приглашению Бора Гейзенберг приехал в Копенгаген из Гёттингена, где он работал ассистентом Макса Борна после окончания университета в Мюнхене под руководством Зоммерфельда. В Дании он сразу же попал в обстановку научных споров, в среду людей, для которых квантовая физика стала главным делом жизни. Полгода прошли в работе и бесконечных дискуссиях всё о том же: почему электрон — объект электродинамики — не подчиняется в атоме её законам, в чём причина удивительной силы нелогичных постулатов Бора и, наконец, что означает в этом случае само понятие «движение»?

Напряжённые размышления Гейзенберга разрешились неожиданной догадкой, которая мало-помалу сменилась уверенностью: движение электрона в атоме нельзя представлять себе как движение маленького шарика по траектории. Нельзя, потому что электрон не шарик, а нечто более изощрённое, и проследить за движением этого «нечто» столь же подробно, как за движением бильярдного шара, невозможно. Поэтому, пытаясь определить

траекторию электрона в атоме, мы задаём природе незаконные вопросы. Вроде тех, которые задавали в древности: «На чём держится Земля?», «Где у неё край?», а немного позднее: «Где у неё верх и низ?»

Гейзенберг утверждал: уравнения, с помощью которых мы хотим описать движение в атоме, не должны содержать никаких величин, кроме тех, которые можно измерить на опыте. Из опытов следовало, что атом устойчив, состоит из ядра и электронов и может излучать, если его вывести из состояния равновесия. Это излучение имеет строго определённую длину волны и, если верить Бору, возникает при перескоке электрона с одной стационарной орбиты на другую. При этом схема Бора ничего не говорила о том, что происходит с электроном в момент скачка, так сказать, «в полёте» между двумя стационарными состояниями. А все, и Гейзенберг в том числе, по привычке добивались ответа именно на этот вопрос. Но в какой-то момент ему стало ясно: электрон не бывает «между» стационарными состояниями, такого свойства у него просто нет!

А что есть? Есть нечто, что он пока даже не мог определить, но был убеждён: оно должно зависеть только от того, *куда* перешёл электрон и *откуда* он пришёл.

До сих пор, исходя из уравнений электродинамики, все пытались найти гипотетическую траекторию $x(t)$ электрона в атоме, которая непрерывно зависит от времени и которую можно задать рядом чисел x_1, x_2, x_3, \dots , отмечающих положение электрона в моменты времени t_1, t_2, t_3, \dots Гейзенберг утверждал: такой траектории в атоме нет, а вместо непрерывной кривой $x(t)$ есть набор дискретных чисел x_{nk} , значения которых зависят от номеров n и k — начального и конечного состояний электрона.

Это очень важное и довольно сложное утверждение можно пояснить про-

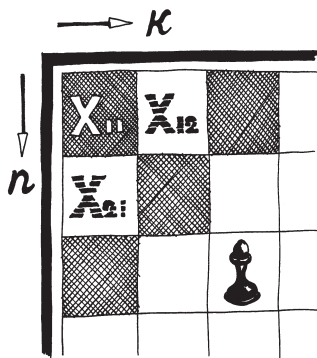
стой аналогией. Представьте, что перед вами шахматная доска, по которой ползёт муха. При желании можно очень подробно проследить её путь, если в каждый момент времени t_i отмечать её положение x_i . По этим измерениям вы затем легко сможете начертить кривую $x(t)$, то есть траекторию движения мухи. Если у вас нет такого желания, достаточно указать квадраты x_{nk} , которые посетила муха на своем пути. Это тоже даст некую информацию о её перемещении, но легко сообразить, что с точки зрения классической механики такое описание будет неполным.

Теперь представьте, что вы за той же доской играете в шахматы и решили, например, сделать традиционный ход $e2 - e4$. В этом случае результат вашего хода совершенно не связан с тем, по какому пути вы передвинули пешку. Это и понятно: правила шахматной игры не зависят от законов механики, а потому и не нуждаются в понятии траектории.

Гейзенберг сообразил, что «правила атомной игры» тоже не требуют знания траектории. В соответствии с этим он представил состояние атома в виде бесконечной шахматной доски, в каждом квадрате которой написаны числа x_{nk} . Естественно, что значения этих чисел зависят от положения квадрата на «атомной доске», то есть от номера n строки и номера k столбца, на пересечении которых стоит число x_{nk} .

Никого не удивляет тот факт, что запись шахматной партии позволяет воспроизвести её даже много лет спустя. Конечно, при этом мы не узнаем, как долго она длилась в действительности, что пережили тогда шахматисты и как именно двигали они фигуры. Но это и не важно, коль скоро нам интересна только игра сама по себе.

Точно так же, если нам известны числа x_{nk} — эта своеобразная запись «атомной



игры», — мы знаем об атоме всё необходимое, чтобы предсказать его наблюдаемые свойства: спектр атома, интенсивность его спектральных линий, число и скорость электронов, выбитых из атома ультрафиолетовыми лучами, а также многое другое. Числа x_{nk} нельзя назвать координатами электрона в атоме. Они заменяют их, или, как стали говорить позже, *представляют* их. Но что означают эти слова — на первых порах не понимал и сам Гейзенберг. Действительно, вместо квадратной таблицы чисел x_{nk} с таким же успехом можно нарисовать всё что угодно, скажем куб, и при этом утверждать, что именно он представляет движение электрона в атоме. Однако тут же с помощью Макса Борна удалось понять, что таблица чисел x_{nk} не просто таблица, а *матрица*.

Что означает это слово? Математика имеет дело с числами и символами, и каждый символ в ней подчиняется своим правилам действия. Например, числа можно складывать и вычитать, умножать и делить, и результат этих действий не зависит от того, в каком порядке мы их производим:

$$5+3=3+5 \quad \text{и} \quad 5 \cdot 3=3 \cdot 5.$$

Но в математике есть и более сложные объекты: отрицательные и комплексные числа, векторы, матрицы и т.д. Матрицы — это таблицы величин типа x_{nk} , для которых определены свои операции сложения и умножения, непохожие на правила действий с обыкновенными числами. Например, складывать и вычитать матрицы, как и обычные числа, можно в произвольном порядке. Однако результат умножения двух матриц зависит от порядка умножения, то есть $x_{nk} \cdot p_{kn} \neq p_{nk} \cdot x_{kn}$. Например, произведение матриц

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

явно отличается от произведения, в котором матрицы переставлены местами:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Правило умножения матриц может показаться странным и подозрительным, но никакого произвола в себе не содержит. По существу, именно оно отличает матрицы от других величин. Конечно, математики о матрицах знали задолго до Гейзенберга и умели с ними работать. Однако для всех было полной неожиданностью, что эти странные объекты с непривычными свойствами соответствуют чему-то реальному в природе. Заслуга Гейзенберга и Борна в том и состоит, что они преодолели психологический барьер, нашли соответствие между свойствами матриц и особенностями движения электронов в атоме и тем самым основали новую, *атомную, квантовую, матричную механику*.

Атомную — потому, что она описывает движение электронов в атоме.

Квантовую — ибо главную роль в этом описании играет квант действия \hbar .

Матричную — поскольку необходи-

мый для этого математический аппарат — матрицы.

В новой механике каждой характеристике электрона: координате x , импульсу p , энергии E , — ставились в соответствие матрицы x_{nk} , p_{nk} , E_{nk} , и уже для них (а не для чисел) записывали уравнения движения, известные из классической механики. А затем надо было только проследить, чтобы все действия над величинами x_{nk} , p_{nk} , E_{nk} не нарушали правил математики.

Макс Борн установил даже нечто большее: он выяснил, что квантово-механические матрицы координаты x_{nk} и импульса p_{nk} — это не любые матрицы, а только те из них, которые подчиняются *перестановочному* (или коммутационному) соотношению

$$x_{nk} \cdot p_{kn} - p_{nk} \cdot x_{kn} = i\hbar,$$

где $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица, а $\hbar = h/2\pi$. В новой механике это *перестановочное соотношение* играет точно такую же роль, как условие квантования Бора в старой механике. И точно так же, как условия Бора выделяют стационарные орбиты из набора всех возможных, коммутационные соотношения выбирают из множества всех матриц только квантово-механические. Неслучайно, что в обоих случаях — и в условиях квантования Бора, и в перестановочных соотношениях — всегда присутствует постоянная Планка \hbar : она непременно входит во все уравнения квантовой механики, и по этому признаку их можно безошибочно отличить от всех других уравнений.

Новые уравнения, которые нашёл Гейзенберг, не были похожи ни на уравнения механики, ни на уравнения электродинамики и потому никак не могли их нарушить. На языке новых уравнений состояние атома полностью задано, если известны все числа x_{nk} и p_{nk} , то есть извест-

ны матрицы, соответствующие координате и импульсу электрона.

Обратите внимание: в наших рассуждениях мы нигде не использовали понятия «движение электрона в атоме». Теперь оно просто не нужно. Согласно Гейзенбергу, движение — это не перемещение электрона-шарика по какой-либо траектории вокруг ядра, а изменение состояния системы «атом» во времени, которое описывается матрицами x_{nk} и p_{nk} . Вместе с вопросами о характере движения электрона в атоме сам собой отпал и вопрос об устойчивости атома. С новой точки зрения в невозбуждённом атоме электрон покоится, а потому и не должен излучать.

Можно и дальше пытаться без формул излагать следствия механики Гейзенберга. Однако это будет так же неестественно, как попытка пересказать словами музыку. Чтобы постигнуть суть и детали квантовой механики, необходимо изучать математику, учиться работать с матрицами — одним словом, надо овладевать

ремеслом физика. В матрицах нет ничего мистического или непостижимого; изучить их значительно проще, чем усвоить, скажем, латынь. Но этому, как и музыке, не следует учиться на ходу. Иначе неприятный осадок полужнания отравит даже то удовольствие, которое доступно каждому: без формул и вычислений почувствовать красоту образов и законченность понятий любой глубокой науки.

Появление матричной механики Гейзенберга физики встретили с облегчением: «Механика Гейзенберга снова вернула мне радость жизни и надежду. Хотя она и не даёт решения загадки, но я верю, что теперь снова можно продвигаться вперёд», — писал Паули 9 октября 1925 г. Свою веру он вскоре сам же и оправдал: применив новую механику к атому водорода, он получил те же результаты, что и Нильс Бор на основании своих постулатов. Конечно, при этом возникли новые проблемы, однако это уже были трудности роста, а не безнадёжность тупика.

Вокруг кванта

Фундамент физики



Основные понятия физики: длина, время, масса, заряд и т.д. — нельзя определить однозначно с помощью слов по двум причинам: во-первых, эти понятия первичны и ни к чему другому, более простому, не сводятся; во-вторых, физика — наука количественная и понятиям сразу же необходимо поставить в соответствие числа. Существует только один способ сделать такие понятия однозначными: задать точный рецепт измерения величин, которые им соответствуют.

Мы уже определяли понятие «длина»: метр — это такая длина, на которой укладывается 1 650 763,73 длины волны красно-оранжевой линии спектра $Kr-86$ в вакууме (изотоп криптона с массовым числом 86). Принятая за эталон спек-

Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немислима без меры.

Дмитрий Менделеев

Мы не знаем, долго ли просуществует земля и небо, но знаем, что всегда 3 и 7 будет 10.

Аврелий Августин

тральная линия соответствует переходу электрона с уровня $2p_{10}$ на уровень $5d_5$. Определённый таким образом метр приблизительно равен $1/40\,000\,000$ части парижского меридиана, принятой первоначально в 1800 г. за эталон метра.

Единица массы «килограмм» определяется как масса платино-иридиевого цилиндра специальной формы (его высота 39 мм равна диаметру основания), который изготовлен в 1789 г. Эта масса приблизительно совпадает с массой 1 л дистиллированной воды при $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Чтобы определить единицу времени, надо использовать какой-нибудь стабильный циклический процесс, например вращение Земли вокруг Солнца. Секунда — это $1/31\,556\,925,9747$ часть тропического года, который равен промежутку времени между двумя одинаковыми положениями Земли относительно звёзд. Однако продолжительность тропического года медленно меняется (на $0,5$ с в столетие) из-за прецессии земной оси и других возмущений, поэтому в эталоне принята продолжительность 1900 г., а точнее — года, который начался в 12 ч дня 31 декабря 1899 г.

С течением времени убедились, однако, что единицу времени, так же как и единицу длины, лучше всего определять на основе спектроскопических измерений. В 1967 г. XIII Генеральная конференция мер и весов дала новое определение секунды, согласно которому секунда — это продолжительность $9\,192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующего переходу электрона между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния изотопа цезия ^{133}Cs с массовым числом 133 (цезиевый стандарт частоты).

Переход к атомным стандартам длины и времени был неизбежен не только потому, что спектроскопия — самый точный раздел физики. Дело в том, что атомные стандарты необычайно стабильны: они практически не зависят ни от температуры, ни от давления, ни даже от космических катастроф, чего нельзя сказать о первоначально принятых эталонах. Например, «стандартный метр» хранят под стеклянным колпаком, при постоянной температуре, в железном шкафу, в глубоком подвале, три ключа от которого хранятся у трёх разных должностных лиц, и с прочими предосторожностями. По той же причине «стандартный килограмм» за последнее столетие извлекали из хранилища только три раза. Ещё хуже обстоят дела с секундой. В самом деле, если через Солнечную систему неожиданно пролетит какое-то небесное тело, то период обращения Земли вокруг Солнца необратимо изменится, а вместе с ним изменится и продолжительность секунды. Ничто подобное не грозит атомным стандартам:

Чудеса современной науки далеко превосходят чудеса древней мифологии.

Ральф Эмерсон

они устойчивы и неизменны, как и сам атом, на свойствах которого они основаны.

Три единицы — метр, килограмм, секунда — образуют часть принятой сегодня системы единиц СИ и достаточны для описания всех механических движений. В науке XX века, когда были сделаны основные открытия атомной физики, традиционно использовалась другая система единиц — СГС, в основу которой положены *сантиметр, грамм, секунда*. Электромагнитная теория требует измерения ещё двух фундаментальных величин: заряда электрона e и скорости света c . А чтобы описать атомные явления, необходимо знать также значение постоянной Планка h .

Для точного определения фундаментальных физических констант в 1875 г. создано Международное бюро мер и весов, которое раз в шесть лет собирает Генеральные конференции мер и весов. На них тщательно оговариваются все технические подробности условий, при которых происходят измерения: температура, давление, высота над уровнем моря и т. д. Столь же скрупулезно перечисляются все детали приборов для измерения этих величин.

Отметим важную особенность таких измерений: только в редких случаях удаётся определить одну величину независимо от других. В остальных случаях необходимо использовать законы физики. Скажем, если скорость v частицы постоянна, то можно определять её, измеряя расстояние Δx , которое частица пройдет за время Δt :

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

и наоборот: эталон метра можно определить по формуле

$$l = c \Delta t,$$

где $c = 299\,792\,458$ м/с — скорость света в вакууме, а $\Delta t = 1/c$ секунд, т.е. 30,663190 периодов цезиевого стандарта частоты. Именно это определение метра было принято в 1983 г. Это один из примеров того, что все фундаментальные константы в некотором смысле взаимосвязаны. Существует специальный и довольно сложный раздел физики — метрология, задача которого — непротиворечиво определить весь набор физических констант, учитывая одновременно все данные об их измерениях.

Самый трудный вопрос — о границах применимости понятий, определённых таким способом. Легко сообразить, что единицы измерения — метр, килограмм, секунда — выбраны естественно, поскольку они соизмеримы с размерами

Каждый школьник знает сегодня истины, за которые Архимед отдал бы жизнь.

Эрнест Ренан

*Там, где заканчивается
телескоп, начинается
микроскоп. Какая из кар-
тин грандиознее?*

Виктор Гюго

самого человека. Действительно, 1 м — это рост пятилетнего ребенка, 1 кг — масса буханки хлеба, 1 с — один удар сердца. Сохраняют ли эти понятия свой прежний смысл при переходе к очень большим и очень малым расстояниям, массам и промежуткам времени?

Общего ответа на этот вопрос пока не существует. Например, у нас был случай убедиться, что к электрону понятие размера уже неприменимо. В теории атома, где понятие «движение» пришлось заменить новым, прежние понятия «длина», «масса», «время» все ещё сохраняют свою силу. Это означает, что по крайней мере расстояние 10^{-8} см = 10^{-10} м, масса 10^{-24} г = 10^{-27} кг (размер и масса атома) и промежуток времени 10^{-17} с (период обращения электрона в атоме) ещё можно понимать в их обычном смысле.

Аналогичная проблема возникает и в астрономии при попытке осмыслить огромные расстояния до галактик. Пожалуй, здесь она даже труднее: действительно, никто не может с лёгким сердцем утверждать, что он вполне понимает слова «расстояние в один миллиард световых лет». Формально всё предельно просто: это расстояние, которое проходит луч света за 10^9 лет, то есть расстояние в $10^9 \cdot (3,15 \cdot 10^7 \text{ с}) \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) = 10^{25}$ м. Но как понять или хотя бы почувствовать, что в действительности скрывается за этим символом?

Воистину прав Паскаль: «Человек распят между двумя бесконечностями».



Русалка, Европа

Глава седьмая

Луи де Бройль
Волны материи
Оптико-механическая аналогия
Волновая механика Шрёдингера

Вокруг кванта
Жизнь...
...и атом Бошковица
Пауль Эренфест

В свои 23 года венгерский офицер Янош Больяи открыл неевклидову геометрию и был счастлив этим до тех пор, пока не узнал, что где-то на границе Азии и Европы Николай Иванович Лобачевский обнародовал ту же геометрию несколькими годами ранее. И тогда жизнь Яноша стала походить на кошмар: повсюду ему чудились шпионы и соглядатаи, он подозревал всех, даже своего отца, всю жизнь посвятившего той же проблеме. Наверное, Фаркаш Больяи не был так гениален, но он был человечнее и мудрее сына. Умирая, он говорил ему: «Не отчаивайся: когда приходит весна — все фиалки расцветают сразу».

В науке об атоме такая весна наступила в 1925 г.: всего за два года появилась, расцвела и даже дала первые плоды новая

наука — квантовая механика. Её основы с тех пор не изменились: так внезапно среди океана возникает вулканический остров и затем уже не меняется столетиями. Конечно, всё это — и остров в океане, и весна — неожиданны лишь для тех, кто не следил за подземными толчками и равнодушно проходил мимо набухших почек. В первой части мы стремились почувствовать именно эти глухие толчки новых фактов, разглядеть то незаметное движение идей, с которых и началась весна квантовой механики.

Статья Гейзенберга с изложением идей матричной механики появилась осенью 1925 г. Это была первая последовательная теория атома, объяснившая его устойчивость. Но (вполне по законам весны!) всего полгода спустя Эрвин Шрёдин-

гер создал ещё одну, *волновую механику*, которая на первый взгляд была совсем непохожа на матричную механику, но столь же хорошо объясняла строение атома. Впоследствии оказалось, что и матричная, и волновая механики — просто разные формы записи единой квантовой механики. А ещё через несколько лет станет ясно, что квантовая механика — не просто одна из наук, а основа всего современного научного знания.

Луи де Бройль

Гейзенберг родился в тот год, когда была напечатана знаменитая работа Планка. Когда он заканчивал гимназию, его родина Германия воевала со всем миром: с Россией — родиной Менделеева, с Англией — родиной Резерфорда, с Францией, где в 1892 г. родился принц Луи Виктор Пьер Раймон де Бройль (1892 — 1987) — потомок древнего рода и будущий нобелевский лауреат. (В его роду было четыре маршала Франции и создатель волновой оптики Жан Френель, а его прабабкой была Жермена де Сталь.) Как и многие в то время, де Бройль воевал и лишь после войны стал работать в лаборатории своего старшего брата Мориса, который изучал рентгеновские спектры элементов. Морис был лично знаком с большинством ведущих физиков того времени и в его лаборатории не только хорошо знали работы Бора, но и были в курсе всех последних событий в атомной физике.

Луи де Бройля занимал всё тот же вопрос: «Почему атомы устойчивы? И почему на стационарных орбитах электрон не излучает?» Первый постулат Бора выделял эти орбиты из набора всех мыслимых орбит квантовым условием, которое связывает радиус орбиты r , скорость v и массу m электрона

с целым числом n квантов действия $\hbar = h/2\pi$:

$$mvr = n \hbar.$$

Де Бройль хотел найти разумные основания для этого условия, то есть стремился объяснить его с помощью других, более привычных понятий, или, другими словами, пытался понять его физический смысл.

Когда ищут объяснение непонятым фактам, как правило, прибегают к аналогиям. Точно так же поступил и де Бройль. В поисках выхода из тупика противоречивых представлений об атоме он догадался, что трудности эти сродни тем, которые возникли при попытках понять противоречивые свойства света. Со светом дело запуталось окончательно в 1923 г., когда Артур Комптон (1892–1962) поставил свой знаменитый опыт и доказал, что рассеяние рентгеновских лучей на электронах несколько не похоже на рассеяние морских волн, зато в точности напоминает столкновение двух бильярдных шаров, один из которых — электрон с массой m , а другой — световой квант с энергией $E = h\nu$. После опыта Комптона и объяснения, данного им самим и Петером Дебаем (1884–1966), уже нельзя было сомневаться в том, что в природе реально существуют световые кванты — фотоны с энергией $E = h\nu$, импульсом $p = h\nu/c$ и длиной волны $\lambda = c/\nu$, которой эти кванты соответствуют.

Ни де Бройль, ни его современники не могли объяснить, что означают слова «световые кванты соответствуют световой волне»: для них различие между частицей и волной было столь же отчётливым, как между скрипкой и её звуком. Однако у них не было оснований подвергать сомнению эксперименты, из которых следовало, что в одних условиях световой луч ведёт себя как волна с длиной λ и частотой ν , а в других — как поток частиц-фото-

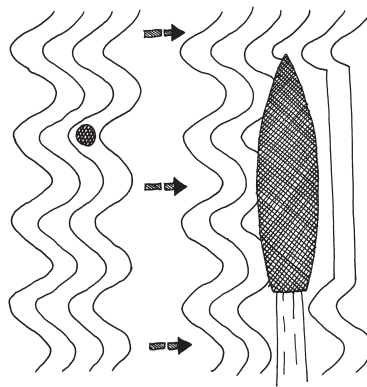
нов с энергией $E=h\nu$ и импульсом $p=h/\lambda$ (раньше их называли *корпускулами*). Года через три-четыре все поймут, что это явление — лишь частный случай всеобщего *корпускулярно-волнового дуализма* в природе, но в то время де Бройлю пришлось находить верную дорогу наощупь.

Волны материи

Де Бройль верил в единство природы, верил искренне и глубоко — как все великие учёные до него. Поэтому он не мог допустить, что луч света — нечто особенное и ни на что другое в природе не похожее. Де Бройль предположил: не только луч света, но и *все тела в природе должны обладать и волновыми, и корпускулярными свойствами одновременно*. Поэтому, кроме световых волн и корпускул света, в природе должны реально существовать не только частицы, но и волны материи.

Такое простое и сильное утверждение нелегко высказать — для этого нужны смелость и вера. Ещё труднее его понять — на это способен лишь непредвзятый ум, привычный к абстрактному мышлению. И вряд ли можно это наглядно представить — природа, доступная восприятию наших пяти чувств, не создала зримых образов, которые могли бы помочь в этих усилиях. В самом деле, при слове «частица» вам может прийти на память всё, что угодно: песчинка, бильярдный шар, летящий камень, но вы никогда не вспомните морские волны или колеблющуюся струну. Для нормального человека это настолько несовместимые образы, что объединять их в один кажется противоестественным.

Всякий рассказ о рождении новой физической теории заведомо неточен даже в устах её создателей: такой рассказ, как правило, использует понятия, которых в момент создания теории не было. У ныне живущих физиков понятие «волна мате-



рии» вызывает в сознании некий сложный образ, который ничему привычному в окружающем нас мире поставить в соответствие нельзя. Образ этот складывается постепенно, при работе с формулами квантовой механики, при решении квантовых задач, и рассказать о нём словами довольно трудно. Понятно, что такого сложного и совершенного образа в 1923 г. у де Бройля не было. Чтобы пояснить его тогдашние рассуждения, мы также используем подходящий заменитель, а именно образ волны, которая возникает при колебаниях струны.

Хорошо известно, что при ударе по натянутой струне она начинает звучать и звук этот зависит от натяжения и длины струны. Механизм появления звука также хорошо известен: колебания струны передаются воздуху, и мы воспринимаем уже его колебания, а не струны. Однако между ними существует однозначная связь. Например, если мы слышим ноту «ля» первой октавы, то в этот момент струна колеблется с частотой $\nu = 440$ Гц, то есть 440 колебаний в секунду. А поскольку скорость звука в воздухе равна $v = 344$ м/с, то длина этих звуковых волн равна $\lambda = v/\nu = 0,78$ м.

При колебаниях струны мы слышим основной тон — такое колебание, когда вся струна колеблется как целое. Однако при её возбуждении возникают и дополнительные колебания — обертоны. Картина колебаний усложняется, на струне появляются «узлы», то есть такие точки, которые остаются неподвижными в процессе колебания. Но всегда строго соблюдается одно условие: на длине струны уместается целое число полувольт $\lambda/2$. Для основного тона на длине струны укладывается ровно половина волны $\lambda/2$. Для первого обертона — две половины волны, между которыми расположен неподвижный «узел», и т. д.

Дальнейшее сравнительно просто. Свернём наши струны в кольцо и представим себе, что это орбиты электрона в атоме. Теперь заменим движение электрона по ним колебаниями волн, которые «соответствуют электрону» — де Бройль был убеждён, что это разумно, — и предположим, что движение электрона будет устойчивым тогда и только тогда, когда на длине орбиты укладывается целое число n «волн электрона» λ . Отсюда следует простое условие:

$$2\pi r = n\lambda.$$

Теперь достаточно сравнить это условие с первым постулатом Бора

$$2\pi mvr = nh$$

и найти отсюда «длину волны электрона»:

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Вот и всё. Это действительно просто. Но это так же просто, как формула Планка $E = h\nu$, как постулаты Бора, как закон всемирного тяготения Ньютона — это гениально просто. Такие открытия просты, ибо требуют самых простых понятий. Но они меняют самые основы нашего

мышления. В истории развития человеческого духа их считанное число. И никогда нельзя до конца понять, **как** они были совершены. Это всегда чудо, объяснить которое не под силу даже самим создателям. Они могут лишь вслед за Ньютоном повторить: «Я всё время об этом думал».

Де Бройлю было 30 лет, когда он нашёл свою формулу. (Заметка де Бройля «Волны и кванты» была напечатана в сентябре 1923 г., а 25 ноября 1924 г. он защитил диссертацию в знаменитой Сорбонне.) Но искать её он начал за двенадцать лет до этого — с тех самых пор, как его брат Морис приехал из Брюсселя, где он был секретарем I Сольевеского конгресса. Того самого конгресса 1911 г., на котором Планк рассказал о развитии «гипотезы квант». Значительность открытий, живые впечатления старшего брата от общения с великими физиками настолько поразили воображение младшего, что он не смог забыть их даже на войне. Постоянное напряжение мысли разрешилось, наконец, в 1923 г. гипотезой о волнах материи. Теперь де Бройль смог дать новое определение понятию «стационарная орбита»: это такая орбита, на которой укладывается целое число «волн электрона» $\lambda = h/mv$.

Если это действительно так, то проблемы устойчивости атома не существует, ибо в стационарном состоянии он подобен струне, колеблющейся в вакууме без трения. Такие колебания не затухают, а потому без внешнего воздействия электрон останется в стационарном состоянии навсегда.

Самое трудное — высказать гипотезу. Это всегда процесс нелогический. Но как только она высказана, законы логики позволяют извлечь из неё все следствия. Главное из них очевидно: если «волны материи» существуют, то их можно обнаружить и измерить. Через четыре года «волны электрона» действительно нашли

и доказали их реальность с той степенью строгости, какая принята в физике.

Свои формулы де Бройль написал за два года до работ Гейзенберга и Шрёдингера. Их простота и прозрачность основной идеи очень напоминали постулаты Бора. И точно так же, как постулаты Бора, идеи де Бройля ещё не давали теории атома — для этого их необходимо было записать на языке уравнений. Когда Вернер Гейзенберг создал матричную механику, он тем самым превратил идеи Бора в точные формулы и строгие уравнения. Идеи де Бройля стали началом волновой механики, которую создал Эрвин Шрёдингер.

Оптико-механическая аналогия

Говорим ли мы об атомах или о квантах — мы вновь и вновь обращаемся к свойствам света. Это неслучайно: по существу, именно в них надо искать истоки почти всей нынешней физики. Сейчас мы ещё раз — и более пристально — взглянем на эти свойства. Для этого нам нужно возвратиться к Исааку Ньютону и вспомнить смысл его спора с Христианом Гюйгенсом о природе света.

Всегда, во все времена, все знали, что луч света в пустоте распространяется прямолинейно. В учебниках этот факт изображают обычно прямой линией, соединяющей источник света и глаз наблюдателя, то есть рисуют воображаемую траекторию светового луча.

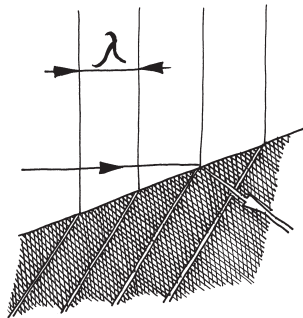
И по смыслу и по возникающим образам эта траектория ничем не отличается от траектории движения частицы. На этом основании во времена Ньютона луч света представляли себе как поток очень маленьких частиц. Конечно, путь этих «световых частиц», как и путь обычных частиц, может искривляться, скажем, при переходе из воздуха в воду, но понятие траектории при этом всё равно сохраняет-

ся. В повседневной жизни представление о траектории светового луча очень полезно и не приводит к недоразумениям: оно помогает избегать автомобилей на улицах, конструировать фотоаппараты и определять положение звёзд на небе.

С развитием экспериментальной физики люди раздвинули узкие границы повседневного опыта и обнаружили новые свойства светового луча: оказывается, он полностью теряет свои привычные свойства, если им осветить «очень маленькое препятствие». Физика — наука количественная, и в ней такое неопределённое утверждение не имеет смысла. «Маленькое» — по сравнению с чем?

Христиан Гюйгенс представлял себе распространение света как колебания некоего «светоносного эфира». Образ, возникающий при этом в сознании, напоминает круги от брошенного в пруд камня либо же бесконечные ряды морских волн. В правомерности этих образов окончательно перестали сомневаться после трудов Максвелла и Генриха Герца, которые доказали, что свет — это просто частный случай электромагнитных волн.

Вспомним (мы об этом говорили в первой главе): главные характеристики всякого волнового процесса — это его частота и длина волны. Теперь наше утверждение приобретает строгий смысл: «луч света теряет свои привычные свойства, если размеры препятствия соизмеримы с длиной его волны». В этом случае луч света уже не распространяется прямолинейно — происходит *дифракция*, т.е. искривление траектории светового луча. Кроме того, отдельные волны начинают взаимодействовать между собой — усиливать и гасить друг друга, или, как принято говорить в физике, начинают *интерферировать*. Сочетание обоих этих явлений — *дифракции и интерференции* — в конечном итоге даёт на экране интерференционную



картину, которую с точки зрения Ньютона понять довольно трудно (хотя именно он открыл знаменитые «кольца Ньютона», обязанные этому явлению). Волновая теория света объясняет это явление вполне естественно, и это, в конечном счёте, определило её победу.

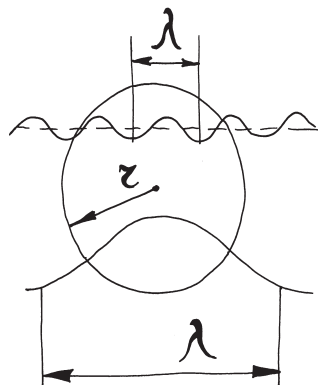
Со временем к волновым свойствам света настолько привыкли, что они превратились в некий эталон для всех волновых процессов в физике. Теперь, если в каком-либо процессе замечали вдруг явления интерференции и дифракции, то уже не сомневались в его волновой природе. Потому, собственно, все сразу и признали гипотезу де Бройля о волнах материи, увидев первые снимки дифракции электронов. Для нынешнего поколения физиков волновые свойства электрона уже не вопрос веры, а факт точного знания и даже основа технических приложений.

В стройной теории волновой оптики оставалась одна неувязка: луч света мы воспринимаем всё-таки как луч, а не как волну. Как объяснить такой факт с точки зрения волновой оптики? Эту задачу решил Огюстен Жан Френель (1788–1827), и его объяснение можно найти теперь

в любом учебнике физики. Оказывается, интерференция приводит к тому, что все волны от источника света гасят друг друга, кроме тех, которые находятся внутри узкого канала, соединяющего источник света и глаз наблюдателя. Толщина этого канала равна половине длины волны света, то есть равна $\lambda/2 \approx 2 \cdot 10^{-5}$ см. Если мы пренебрежём толщиной этого «светового канала», то получим ту самую траекторию светового луча, к которой все мы привыкли в обычной жизни.

Известен даже способ её построения: сначала нужно провести линии через все гребни волн — как говорят в физике, отметить *фронт волны*, а затем от источника света провести линию, которая перпендикулярна фронту волны. Это и будет траектория светового луча. Если вблизи препятствия фронт волны искажается, то одновременно с этим искривляется и траектория луча — луч света огибает препятствие, происходит дифракция.

В 1834 г. Уильям Роуан Гамильтон (1805–1865), знаменитый на весь мир профессор астрономии в Дублинском университете, занимался непонятной для современников задачей. Он хотел доказать, что формальная аналогия между траекторией движения частицы и траекторией светового луча имеет строгий математический смысл. Мы уже знаем: в физике понятию закона движения соответствуют формулы — уравнения движения. Для волн и частиц они совершенно различны: решая одни, мы вычисляем траекторию частицы, решая другие, находим форму и скорость фронта волны. Но мы также знаем, что в оптике можно нарисовать траекторию светового луча, зная движение фронта его волны. Гамильтон доказал, что в механике можно сделать нечто противоположное: заменить траекторию движения частицы распространением фронта некоторой волны. Или, более точно, уравне-



ния движения механики можно записать в таком виде, что они полностью совпадут с уравнениями геометрической оптики, которые описывают распространение луча света без учёта его волновых свойств. Тем самым Гамильтон доказал *оптико-механическую аналогию*: движение частицы по траектории можно представить как распространение луча света без учёта его волновых свойств.

В своё время эти исследования Гамильтона (как и многие другие, например исчисление гиперкомплексных чисел — кватернионов) не были по достоинству оценены современниками. Лишь почти столетие спустя эти работы нашли достойное продолжение в трудах Шрёдингера.

Волновая механика Шрёдингера

Эрвин Шрёдингер (1887–1961) в 1911 г. окончил Венский университет, ещё хранивший традиции Доплера, Физо, Больцмана и дух классических времён физики: основательность при изучении явлений и неторопливый к ним интерес. В 1925 г.

он был уже немолодым профессором Цюрихского университета, сохранившим, однако, юношеское стремление понять самое главное в тогдашней физике: «Как устроен атом? И как в нём движутся электроны?».

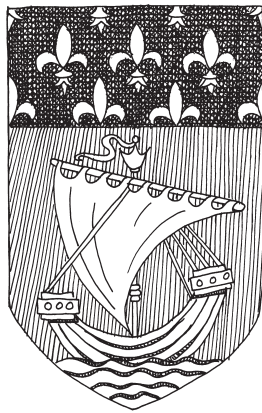
В конце 1925 г. в одной из статей Эйнштейна Шрёдингер прочёл несколько слов похвалы в адрес де Бройля и его гипотезы. Этих немногих сведений ему оказалось достаточно: он поверил в гипотезу о волнах материи и развил её до логического конца (что всегда трудно, и не только в науке). Ход его рассуждений легко понять, по крайней мере теперь, почти сто лет спустя. Вначале он вспомнил оптико-механическую аналогию Гамильтона. Он знал, что она доказана лишь в пределах геометрической оптики — тогда, когда можно пренебречь волновыми свойствами света. Шрёдингер пошёл дальше и предположил: оптико-механическая аналогия остаётся справедливой также и в случае волновой оптики. Это означает, что *движение частиц можно уподобить распространению волн*.

Как и всякое глубокое открытие, гипотеза Шрёдингера ниоткуда логически не следовала. Но, как всякое истинное открытие, логические следствия она имела. Прежде всего, если Шрёдингер прав, то движение частиц должно обнаруживать волновые свойства в тех областях пространства, размеры которых сравнимы с длиной волны этих частиц. В большой мере это относится и к движению электрона в атоме: сравнив формулы де Бройля $\lambda = h/mv$ и Бора $2\pi mvr = h$, легко усмотреть, что радиус атома $r = \lambda/2\pi$ примерно в шесть раз меньше, чем длина волны электрона λ . Если эту длину отождествить с размером электрона в атоме, то сразу становится очевидным, что представлять его в атоме частицей невозможно, ибо тогда придётся допустить, что атом построен из таких частиц, которые больше

его самого. Отсюда сразу, и немного неожиданно, следует уже известный нам из предыдущей главы постулат Гейзенберга: не существует понятия траектории электрона в атоме.

Действительно, не может нечто большее двигаться внутри чего-то меньшего, и притом по траектории. Но тогда не существует и проблемы устойчивости атома, так как электродинамика запрещает электрону двигаться в атоме лишь по траектории и не отвечает за явления, которые происходят при других типах движений. Все это означает, что в атоме электроны существуют не в виде частиц, а в виде некоторых волн, смысл которых вначале был не очень понятен и Шрёдингеру. Он, однако, утверждал: какова бы ни была природа этих электронных волн, их движение должно подчиняться *волновому уравнению*. Шрёдингер нашёл это уравнение. Вот оно:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - V(x)] \psi = 0.$$



Для тех, кто видит его впервые, оно абсолютно непонятно и может возбудить лишь любопытство или чувство инстинктивного протеста, причём последнее — без серьёзных оснований.

В самом деле, рисунок на этой странице столь же непонятен, как и уравнение Шрёдингера, однако мы принимаем его без внутреннего сопротивления. Мы совсем успокоимся, узнав, что перед нами герб Парижа. Только самые дотошные станут допытываться, почему он выглядит именно так, а не иначе. Как и в уравнении Шрёдингера, в этом гербе каждая черта и каждый символ исполнены смысла. Вверху — королевские лилии, которые появились в геральдических знаках Франции уже в конце V века, после победы короля Хлодвиг над гуннами. Внизу герба — корабль, похожий очертаниями на Ситэ — остров посреди Сены, где в древности обитало племя паризиев, по имени которых назван Париж. А форма герба напоминает парус — в память об основном занятии древних обитателей Парижа. Как видите, понять символику герба несложно, хотя по-настоящему близка и естественна она только парижанам.

Подойдем к уравнению Шрёдингера точно так же. Примем его вначале просто как символ квантовой механики, как некий герб квантовой страны, по которой мы теперь путешествуем, и постараемся понять, почему он именно таков. Некоторые символы в этом гербе нам уже понятны: m — это масса электрона; \hbar — постоянная Планка h , делённая на 2π ; E — полная энергия электрона в атоме; $V(x)$ — его потенциальная энергия; x — расстояние от ядра до электрона. Несколько сложнее понять символ d^2/dx^2 , но с этим пока ничего нельзя поделать, вначале придётся просто запомнить, что это символ второй производной от функции ψ , из-за которого

уравнение Шрёдингера не простое, а дифференциальное.

Самое сложное — понять, что собой представляет ψ -функция (пси-функция): достаточно сказать, что вначале даже сам Шрёдингер истолковал её неверно. Мы также поймём это несколько позднее, а пока что просто поверим в то, что ψ -функция «как-то» представляет движение электрона в атоме. Иначе, чем матри-

цы Гейзенберга x_{nk} и p_{nk} , но всё-таки представляет, и притом — хорошо. Настолько хорошо, что с её помощью все задачи квантовой механики можно решать значительно проще и быстрее, чем с помощью матриц Гейзенберга. Физики довольно быстро оценили преимущества волновой механики: её универсальность, изящество и простоту и с тех пор почти забросили механику матричную.

Вокруг кванта

Жизнь...



Гейзенберг

Роджер Иосип Бошкович (1711—1787) сейчас известен только узкому кругу специалистов, но в конце XVIII века он был знаменит, а его теория атома оказала влияние даже на мировоззрение таких людей, как Фарадей и Максвелл.

Бошкович родился и провёл детские годы в Далмации, в Дубровнике (в то время Рагуса). Он был восьмым ребёнком из девяти и самым младшим из шести сыновей в семье крупного торговца. То было время, когда любая деятельность людей получала смысл и признание лишь в том случае, если она была освящена церковью или связана с нею. Уже с 8 лет Бошкович учился в местном иезуитском колледже, а в 14 лет отправился на родину матери, в Рим, и после двух лет искуса был принят в *Collegium Romanum*. Там он отличился в математике, физике и астрономии и в 1736 г. опубликовал первую научную работу о солнечном экваторе и периоде вращения Солнца. В 29 лет он стал преподавателем, а в 33 — священником и членом ордена Иисуса (иезуитов). В продолжение четырнадцати лет он преподаёт физику и математику, изучает абберацию света и форму Земли, создаёт карту Ватикана. В 1760 г. Петербургская академия наук избрала его своим иностранным членом.

В 1757 г. он едет в Вену в составе посольства и там за 11 месяцев пишет книгу «Теория натуральной философии, приведённая к единому закону сил, существующих в природе», которую он обдумывал в течение двенадцати лет. После возвращения из Вены он отправился в четырёхлетнее путешествие в Париж, Лондон, Константинополь, затем читал



де Бройль



Шрёдингер

лекции, работал в обсерватории Милана, снискал ненависть коллег независимостью взглядов и в 1772 г. оказался в Венеции без средств к существованию. Друзья выхлопотали ему место в Париже, где он прожил десять лет и лишь в 1783 г. возвратился в Италию — умирать. В конце 1786 г. он почувствовал признаки умственного расстройства, которое перешло в патологическую меланхолию. После попытки самоубийства он потерял рассудок и 13 февраля 1787 г. закончил свою полную страстей жизнь.

...и атом Бошковича

Из тех немногих, кто в XVIII веке верил в атомы, Бошкович — единственный, кто не верил в атомы — твёрдые шарики. Поэтому его воззрения ближе к нам, чем все атомные теории XIX века.

Своё недоверие к несжимаемым атомам-шарикам Бошкович обосновывал тем, что с помощью таких атомов нельзя объяснить кристаллическую структуру тел и их упругость, плавление твёрдых веществ, испарение жидкостей, а тем более химические реакции между веществами, построенными из этих круглых, твёрдых и непроницаемых атомов.

Бошкович представлял себе атом как центр сил, которые меняются в зависимости от расстояния до этого центра. Ближко к центру — силы отталкивающие, что соответствует отталкиванию атомов при тесном сближении или при их столкновении. При удалении от центра отталкивающая сила сначала уменьшается, затем обращается в нуль и, наконец, становится притягивающей — как раз в этот момент, по мысли Бошковича, образуются все жидкие и твёрдые тела. Но если мы ещё удалимся от центра сил, то силы вновь станут отталкивающими — в этот момент атомы начнут испаряться. Наконец, совсем далеко от атома силы всегда притягивающие, как того и требует закон всемирного тяготения Ньютона.

Таким образом, каждый атом Бошковича «простирается вплоть до границ Солнечной системы», а поскольку центры сил нельзя ни уничтожить, ни создать, то его атомы вечны — так же, как и атомы Демокрита. Именно эта часть учения Бошковича была особенно близка Фарадею: нетрудно усмотреть его аналогию с представлениями Фарадея о силовых линиях электромагнитного поля. И даже на рубеже XX века лорд Кельвин ещё раз обратился к атому Бошковича в попытке объяснить на этом языке природу радиоактивности. Атом Бошковича значительно ближе к современному атому, чем атом Демокрита. Например, как и современный атом,

История физики в нашем веке учит, что отказ от прежних понятий даётся гораздо труднее, чем усвоение новых.

Вернер Гейзенберг

он не имеет определённых геометрических размеров. Зато с его помощью можно понять разнообразие форм кристаллов и всевозможные химические превращения, в которых эти атомы участвуют. Конечно, атом Бошковича — это умозрительная схема, которая не опирается ни на опыт, ни на математику, а лишь на здравый смысл и внимательные наблюдения над природой. Сам Бошкович писал: «Существуют, однако, определённые вещи, связанные с законом сил, относительно которых все мы невежды... Только Он один, кто создал Вселенную, имел перед своими глазами целое».

Квантовая механика позволяет вычислить закон изменения сил между двумя атомами без всякого произвола и ссылок на божественное откровение. С помощью этого закона можно предсказать спектр молекулы водорода, предвидеть, что произойдёт, если смешать водород, например, с хлором, и что изменится, если облучать эту смесь ультрафиолетовыми лучами. Мы в состоянии рассчитать форму кристаллов и даже предсказать цвет химических соединений. Конечно, всё это доступно только тем, кто владеет довольно сложной математикой квантовой физики. Однако понять многие особенности строения и свойств веществ может каждый, кто хоть немного знаком с её образами.

Пауль Эренфест (1880—1933)

Кроме пророков, науке нужны апостолы. Кроме одиноких гениев, которые меняют её русло, науке необходимы люди, хранящие её огонь и способные зажечь его в душах неофитов. Такие люди создают вокруг себя атмосферу интеллектуальной красоты и духовного подъёма, в которой стремительно расцветают таланты и крепнут дарования. Учёными такого редкого типа были Арнольд Зоммерфельд в Германии, Поль Ланжевен во Франции, Леонид Исаакович Мандельштам в России.

Таким человеком был Пауль Эренфест. Он родился и вырос в Вене, учился в Венском университете у Людвиг Больцмана и в Гёттингенском — у Феликса Клейна. Завершив образование, пять лет жил в России и в 1912 г. по предложению Лоренца сменил его на кафедре теоретической физики в Лейденском университете. Здесь в течение двадцати лет он каждый вторник открывал семинар, на котором рассказывали о своих работах все великие и знаменитые учёные, за четверть века перестроившие заново основы физики. На этом семинаре родилась и окрепла гипотеза



Эренфест

В мире человеческой мысли вообще, и в физике в частности, наиболее плодотворны те концепции, которым невозможно придать четкий смысл.

Хендрик Крамерс

Предвззудки не имеют разумных оснований, поэтому их нельзя опровергнуть разумными доводами.

Сэмюэл Джонсон

о спине электрона, и Эренфест был её повивальной бабкой и крёстным отцом. Он был инициатором и организатором знаменитой полемики между Бором и Эйнштейном. Он жил в центре «физических событий» того времени и много способствовал их успешному завершению.

Эренфест был человеком редких душевных качеств. Бор, Планк, Гейзенберг, Паули, Шрёдингер были его частыми гостями. Эйнштейн писал ему: «Мы созданы природой друг для друга. Я нуждаюсь в твоей дружбе ещё больше, чем ты в моей». Но что-то надломилось в душе Эренфеста, и 25 сентября 1933 г. он покончил с собой.

Пауль Эренфест оставил после себя физические идеи, пережившие память его учеников и друзей. Он построил мост через пропасть, которая в сознании его современников отделяла квантовые явления от классических. Суть теоремы, им доказанной, состоит в следующем.

Мы многократно повторяли, что уравнения квантовой механики отличны от уравнений классической механики. Поэтому движения квантовых объектов ни описать, ни представить в классических понятиях и образах нельзя. Примерно так же, как нельзя отметить на глобусе все движения пассажира, пересекающего на пароходе Атлантику. Однако как бы волны ни качали корабль и чем бы ни занимался при этом пассажир, в среднем он всё-таки перемещается в соответствии с заданным курсом.

Нечто похожее справедливо и в квантовом мире. Пусть мы не можем представить себе квантовых движений. Пусть неясно, как понимать координату и импульс электрона. Но точно известно, что *средние значения* квантовых величин подчиняются уравнениям классической механики. В этом суть *принципа соответствия*, который в 1918 г. сформулировал Нильс Бор и в 1927 г. доказал Пауль Эренфест.

Несколько позднее физики поняли, что Эренфест доказал нечто большее, чем предельное соответствие квантовой и классической механики. В самом деле, всегда молчаливо принимали предположение (а многие и до сих пор отстаивают его вслух), что динамические законы классической механики — это первичные, настоящие законы, а статистические закономерности квантовой механики — это законы второго сорта, которыми мы вынуждены пользоваться по причине особой сложности атомных объектов. Из работ Эренфеста следует, что такое убеждение (или, лучше сказать, предубеждение) — не более чем предвззудок, ибо уравнения движения классической механики суть предельный случай более общих уравнений квантовой механики.



Сфинкс, Египет

Глава восьмая

**Уравнение Шрёдингера
Смысл Ψ -функции
Образ атома
Квантовая истина**

Вокруг кванта

**Опыт Комптона
Дифракция электронов**

«Может быть, естествоиспытателя, покидающего область непосредственных чувственных восприятий с целью открытия более общих взаимосвязей, можно сравнить с альпинистом, который хочет подняться на вершину самой высокой горы, для того чтобы обозреть лежащую перед ним местность во всём её многообразии. Альпинисту тоже необходимо покинуть плодородные населённые долины. По мере того как он поднимается, перед ним все шире и шире раскрывается окрестность, но вместе с тем всё реже он видит вокруг себя признаки жизни. Наконец, он попадает в ослепительно яркую область льда и снега, где уже нет никакой жизни и дышать становится почти невозможно. Только пройдя эту область, он может достичь вершины. Но когда он взойдёт на вершину, наступит момент, когда вся рас-

стилающаяся перед ним местность станет ему видна совершенно отчётливо, и, может быть, тогда область жизни не будет слишком далека от него...»

Эти слова Гейзенберга хорошо поясняют тот качественный скачок, который произошёл в сознании людей, когда они перешли от наблюдения явлений, непосредственно воздействующих на их органы чувств, к изучению квантовых объектов. Этот перелом произошёл в начале века, и он настолько важен, что мы ещё раз поясним его на конкретном примере.

Представьте, что перед вами звучит натянутая струна. Вы слышите звук, видите вибрирующую струну, можете прикоснуться к ней рукой, и на основании этих данных в сознании у вас формируется *образ* физического *явления*, происходящего перед вами. *Понятие* «волновой про-

цесс» возникает позднее, при наблюдении других, похожих явлений. Чтобы сделать это понятие однозначным, его закрепляют *формулами*, которые позволяют описать и даже предсказать процесс колебания струны. Это предсказание мы можем проверить на *опыте*, запечатлев, например, колебания струны на киноплёнке...

Мы сознательно ещё раз проследили цепочку

явление → **образ** → **понятие** →
→ **формула** → **опыт**,

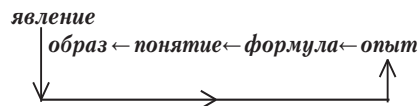
которая лежит в основе первоначального физического знания. Последнее звено в этой цепи — опыт — проверяет, насколько правильно мы представляем себе явление в целом на основе частичных знаний о нём.

Но эта простая схема не поможет нам ответить на вопрос: «Что такое атом?», — просто потому, что явление «атом» не воздействует непосредственно на наши органы чувств, и они не могут дать нам никакого, даже приблизительного «образа атома». Поэтому вначале понятие «атом» возникло чисто умозрительно, без ссылок на органы чувств, и в течение двадцати веков оставалось не более чем любопытной гипотезой, которая ничем не лучше других гипотез о строении материи.

Настоящая история атома началась с приходом науки, когда люди научились полагаться не только на свои органы чувств, но также доверять показаниям приборов. С их помощью они наблюдали, что происходит при растворении веществ, при пропускании через раствор электрического тока, при нагревании, при освещении и при многих других воздействиях. Учёные не просто **наблюдали** эти явления, но **изучали** их, то есть **измеряли** температуру тел, длину волны излучаемого ими света, его интенсивность и многое другое, о чём мы уже знаем. Результаты этих из-

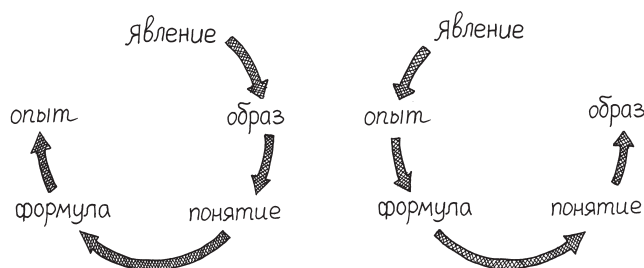
мерений они записывали в виде *чисел*. Вот эти-то числа и заменили физикам непосредственные ощущения, которые доставляли им ранее органы чувств. Числа — единственное, чему они стали доверять, начав изучать явления, недоступные непосредственному чувственному восприятию. Имея в руках эти числа, они стали находить между ними связи и записывать их в виде формул.

Но люди общаются с помощью слов, а не формул, и, чтобы рассказать о новых связях в природе, они придумывают понятия, которые соответствуют этим формулам. Иногда эти понятия очень необычны, но люди к ним быстро привыкают, учатся правильно пользоваться ими и даже создают для себя какие-то образы, связывая их с новыми понятиями. Привычная схема познания переворачивается и приобретает вид:



В истории атома эту цепочку можно легко проследить. Фраунгофер, Кирхгоф и Бунзен обнаружили, что каждый атом испускает строго определённый набор спектральных линий (*явление*) и каждой спектральной линии соответствует число — длина волны λ (*опыт*). Бальмер, Ридберг и Ритц нашли между этими числами простые связи (*формула*), а Бор показал, что их формулы следуют из единого принципа, который назвали квантованием (*понятие*). Наконец, на основе этих опытов, формул и понятий возник *образ* — атом Бора.

Но опыты продолжались, они принесли новые числа и факты, которые уже не вменялись в рамки прежних формул, понятий и образов. И тогда возникла квантовая механика — единый принцип, из которого следовали все прежние эмпирические формулы и удачные догадки.



Мы уже довольно много узнали об опытах атомной физики и о понятиях, которые необходимо использовать, чтобы их объяснить. Но мы хотим большего: на этом новом, более высоком уровне знаний создать зрительный *образ атома*. Для этого нам нужно несколько подробнее познакомиться с формулами квантовой механики. Это необходимо — в конце концов, красота логических построений в науке много важнее, чем эффекты неожиданных ассоциаций, обусловленные её простыми следствиями.

Уравнение Шрёдингера

Всё предыдущее должно было убедить нас в том, что электрон — не точка, он не занимает определённого положения в атоме и не движется там по какой-либо траектории. Взамен этого мы пока что усвоили довольно туманную идею о том, что при движении в атоме электрон «расплывается». Эту расплывчатую идею Шрёдингеру удалось выразить весьма точно на однозначном языке формул. Уравнение Шрёдингера, как и всякий глубокий закон природы, нельзя вывести строго из более простых. Его можно только угадать. (Шрёдингер впоследствии признавался, что и сам не вполне понимает, как ему это удалось.) Но после того как уравнение

угадано, надо ещё научиться им пользоваться: надо знать, что означают все символы в уравнении и какие явления в атоме они отображают.

Уравнение Шрёдингера мы однажды уже приводили:

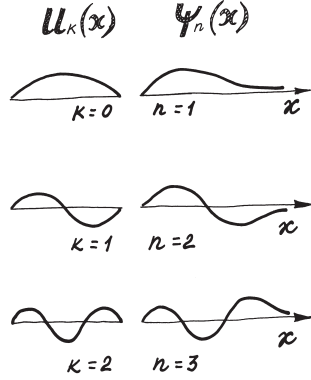
$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - V(x)] \psi = 0,$$

и объясняли входящие в него символы: \hbar — постоянная Планка h , делённая на 2π , m — масса электрона, E — полная энергия электрона в атоме, а $V(x)$ — потенциальная энергия взаимодействия электрона и ядра, удалённых друг от друга на расстояние x . Но нам по-прежнему неясен смысл волновой функции ψ . Чтобы понять его, обратимся снова к аналогии с колеблющейся струной.

Уравнение её колебаний, хорошо известное в классической физике,

$$\frac{d^2u}{dx^2} + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 u = 0,$$

очень похоже на уравнение Шрёдингера. Несколько решений этого уравнения — функции $u_k(x)$ — изображены на рисунке. Это обычные, знакомые всем синусоиды, и смысл их очевиден: они изображают *форму струны* в какой-то момент времени, то есть моментальную фотографию процесса её колебания с длиной волны λ .



Форма колебаний струны зависит от числа узлов k , то есть числа точек, остающихся неподвижными в процессе колебания. Им соответствует бесконечный набор решений $u_k(x)$, которые различаются между собой числом узлов k . Очень важно, что никаких других, промежуточных, типов колебаний, кроме пронумерованных индексом k , не существует.

По форме уравнение Шрёдингера лишь несущественно отличается от уравнения струны. Чтобы последнее утверждение не выглядело голословным, введём обозначение

$$\lambda(x) = \frac{h}{\sqrt{2m[E - V(x)]}},$$

после чего уравнение Шрёдингера примет вид, неотличимый от уравнения колебаний струны:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \left(\frac{2\pi}{\lambda(x)}\right)^2 \psi = 0.$$

Если потенциал взаимодействия $V(x)=0$, то есть электрон движется свободно вдали от ядра, то энергия E равна его кинетической энергии, $E=mv^2/2$, и, следовательно, длина его волны постоянна

$$\lambda(x) = \lambda = \frac{h}{mv},$$

и равна длине волны де Бройля. В этом случае уравнение Шрёдингера в точности совпадает с уравнением струны. При движении в атоме электрон взаимодействует с протоном по закону Кулона, поэтому $V(x) = -e^2/x$, где e — заряд электрона и протона. Теперь уже «длина волны электрона»

$$\lambda(x) = \frac{h}{\sqrt{2m[E - V(x)]}}$$

не имеет определённого значения и меняется от точки к точке. Однако и в теории колебаний струны такой случай — не новость: если вместо однородной струны колеблется неоднородная, то есть струна со всевозможными грузами и утолщениями, то её колебания будут описываться именно таким уравнением. Решения его лишь отдалённо напоминают правильные синусоиды, но они сохраняют главное свойство прежних решений: для них характерно наличие узлов, неподвижных в процессе колебаний, по числу которых эти решения можно пронумеровать.

Таким образом, формально уравнение Шрёдингера ничем не отличается от уравнения нагруженной струны, но смысл их, конечно, различен. Вся его сложность — в понятиях, которые мы связываем с величинами, удовлетворяющими этому уравнению.

Взгляните на рисунок, где рядом с синусоидами струны $u_k(x)$ изображены решения $\psi_n(x)$ уравнения Шрёдингера для атома водорода. Они очень похожи. И если даже никаких реальных колебаний, подобных движениям струны, в атоме не происходит, то аналогия не становится от этого менее полезной.

Отмеченная аналогия позволяет пронумеровать решения $\psi_n(x)$ целым числом n точно так же, как решения $u_k(x)$ нуме-

руются целым числом k , причём никаких других решений, кроме этих, в уравнении Шрёдингера не содержится. Более того, целое число n — это и есть то самое непонятное *квантовое число*, которым Бор нумеровал орбиты электрона в атоме. Теперь оно потеряло свой мистический оттенок: n — это не что иное, как число узлов волновой функции, увеличенное на единицу: $n = k+1$. Основному состоянию $n=1$, соответствует решение без узлов, т.е. $k=0$.

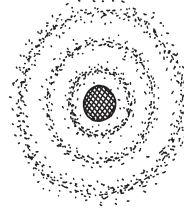
Первый постулат Бора неким «усилием воли» предписывал электронам двигаться только по тем орбитам в атоме, которые удовлетворяют квантовому условию: $mvr = n\hbar$. Это был плодотворный, но неестественный для физики принцип, и потому он вызвал у современников сложную смесь восхищения и недовольства. Требование Шрёдингера значительно естественнее: как бы хитро не двигался электрон в атоме, он должен всё-таки находиться *внутри* атома. Поэтому ψ -функция, которая это движение «представляет», независимо от своей природы должна быть сосредоточена вблизи ядра. Вот из этого единственного и естественного *граничного условия* однозначно следует, что уравнение Шрёдингера имеет решение не всегда, а только при определённых значениях энергии E_n , которые соответствуют *собственным функциям* $\psi_n(x)$. Допустимые значения энергии атома водорода можно найти, решив уравнение Шрёдингера с потенциалом

$$V(x) = -\frac{e^2}{x}.$$

Эти *собственные значения* энергии E_n стационарных состояний дискретны и нумеруются целым числом n :

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}.$$

Легко видеть, что эти значения в точности совпадают с энергией электрона на стационарных орбитах в атоме Бора, и поэтому



надобность в постулатах Бора отпадает, — при сохранении всех положительных результатов его модели.

В своё время эти следствия теории Шрёдингера покорили многих своей простотой и естественностью, в уравнение Шрёдингера поверили и стали выяснять последнее: что представляет собой сама функция $\psi_n(x)$. И если функция $u_k(x)$ изображает форму колеблющейся струны, то форму *чего* изображает ψ -функция?

Смысл Ψ -функции

Это один из самых сложных вопросов квантовой механики, на который даже сам Шрёдингер вначале ответил неправильно. Но его ответ так удобен и так близок к истине, что мы им на первых порах воспользуемся.

Электрон в атоме не существует как частица. Он расплывается там в некое облако. Форма и плотность этого облака в квантовом состоянии n определяются волновой функцией $\psi_n(x)$, причём на расстоянии x от ядра плотность $\rho_n(x)$ электронного облака в квантовом состоянии n равна квадрату этой функции:

$$\rho_n(x) = |\psi_n(x)|^2.$$

Чтобы пояснить эту мысль, попытаемся представить себе, например, арбуз и изобразить на рисунке его плотность $\rho(x)$ в зависимости от расстояния x до центра арбуза. Очевидно, что функция $\rho(x)$ для арбуза везде примерно постоянна, она лишь

несколько падает к краям (корка легче мякоти) и, наконец, резко обрывается на границе арбуза. Взглянув на рисунок, человек, даже ни разу не выдавший арбуза, может схематически представить себе, как он устроен внутри. Правда, при этом он не будет иметь ни малейшего представления о его вкусе, цвете и аромате, а также о тысяче других мелких признаков, которые отличают один арбуз от другого.

Пытаясь проникнуть внутрь атома, все мы оказываемся в положении человека, который никогда в жизни арбуза не видел, но хочет представить его себе по функции $\rho(x)$. Для атома функцию $\rho(x)$ можно вычислить из уравнения Шрёдингера и затем с её помощью нарисовать распределение электронного облака в атоме. Именно эти картины заменяют нам тот зрительный образ атома, к которому все бессознательно стремятся.

На следующей странице представлены объёмные изображения атома водорода в различных состояниях возбуждения с квантовыми числами n , l , m , построенные по функциям $\rho_{nlm}(x) = [\psi_{nlm}(x)]^2$, вычисленным из уравнения Шрёдингера. Это и есть тот новый образ атома, к которому мы так долго шли и к которому теперь надо привыкать. В дальнейшем этот образ изменится лишь немного — точнее не сам он, а наше к нему отношение.

Теперь всё самое сложное позади, и мы можем не торопясь подвести итоги. Прежде всего — и на новом уровне знаний — мы вновь обратимся к вопросу: «Что такое атом?»

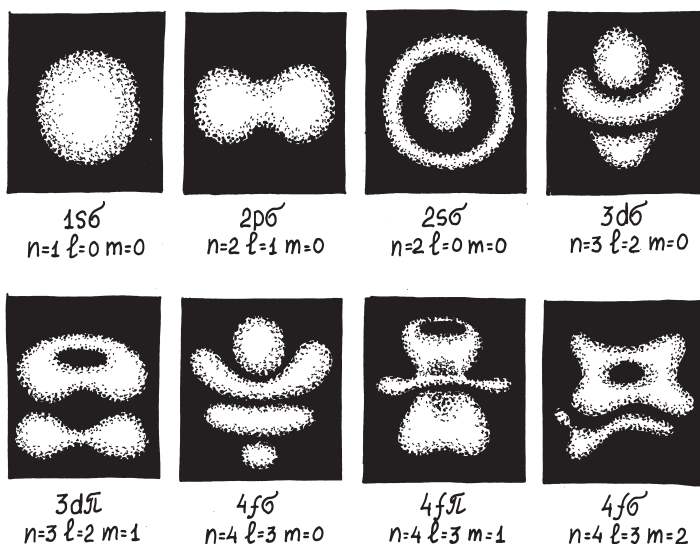
Образ атома

Вспомните модель Томсона: большой положительно заряженный шар, и в нём плавают маленькие отрицательные электроны. В действительности всё оказалось строго наоборот: в центре атома располо-

жено очень маленькое положительно заряженное ядро, окружённое отрицательным облаком электронов. Форма этого облака не произвольна, — она определяется законами квантовой механики. Конечно, это не шарик с резкими границами, но в целом невозбуждённый атом водорода в состоянии $1s$ очень похож на шар (это Демокрит угадал правильно). Однако форма возбуждённых атомов уже отличается от сферической и тем больше, чем сильнее возбуждён атом. Возбуждая атом, мы затрачиваем энергию как раз на перестройку его электронного облака. Каждой форме облака соответствует своя, вполне определённая энергия. Поэтому, чтобы перевести атом из одной формы в другую, мы должны затратить строго отмеренное количество энергии — квант $h\nu$, как того и требует второй постулат Бора.

До сих пор мы говорили только об атоме водорода. По существу, это единственный атом, который физик знает сейчас во всех деталях и может представить себе его правдоподобный образ. Форма электронного облака в сложных атомах в целом также не очень сильно отличается от наших рисунков. Но рассчитать её достаточно точно удалось лишь после работ советского физика Владимира Александровича Фока (1898—1974) и английского учёного Дугласа Хартри (1897—1958). Это очень сложная задача, которая под силу только современным вычислительным машинам.

Говоря о форме тел, мы, как правило, предполагаем, что у них есть также и размеры. Это не всегда верно: у бильярдного шара есть и форма, и размеры, но о размерах облака говорить уже довольно трудно, хотя форма его обычно не вызывает сомнений. Самое неожиданное следствие новой модели атома состоит в том, что *атом не имеет определённых геометрических размеров*. Размеры в том смысле, какой мы вкладываем в это понятие, имея перед



глазами, например, бильярдный шар. Конечно, поскольку атом имеет определённые очертания, можно выделить из него ту его часть, в которой плотность электронного облака максимальна, и назвать эту часть его размером. Такое определение правомерно, и мы его используем (мы постоянно говорим о размерах атома), но при этом следует помнить, что определить строго размеры облака нельзя: это всегда вопрос разумного соглашения.

Уже одно это следствие квантовой механики позволяет объяснить многие наблюдаемые свойства тел. Например, разнообразие геометрических форм кристаллов не должно нас теперь особенно удивлять: из одинаковых кирпичей построены самые разные дома, но нам не кажется странным, что кирпичи — это не дом в миниатюре, а просто кирпичи. У тел, окружающих нас, есть цвет, запах, есть размеры, но атомы, из которых построены эти тела, не обладают ни одним из этих

качеств. Точно так же у них нет определённой формы. Неизменны лишь законы квантовой механики, которые управляют этой формой.

Но почему атом, у которого даже нет определённых размеров, так устойчив? Нас не должно удивлять и это: Земля ведь не стоит на трёх китах, а наоборот, повиснув в пустоте, уже миллионы лет сохраняет свою орбиту неизменной. Секрет её устойчивости — в движении и в неизменности динамических законов, которые этим движением управляют. В этом же причина устойчивости атомов, хотя законы, управляющие движением электронов, совсем не похожи на законы небесной механики.

Справедливости ради следует заметить, что квантовая устойчивость значительно надёжнее, чем динамическая устойчивость классической механики: разрушенный атом восстанавливает свою структуру, но орбита Земли уже никогда не станет прежней, если однажды её на-

рушит внезапное вторжение инородного космического тела.

Атомы различных элементов разнятся между собой массой и зарядом ядра. Но по какому признаку различить два атома одного и того же элемента? Для арбузов такой вопрос неактуален: никто никогда не видел двух совершенно одинаковых арбузов. Отличить один кирпич от другого уже много сложнее, и только в том случае, если кирпичи битые, задача немного упрощается.

С атомами дело обстоит точно так же. Если массы и заряды их ядер равны, то различить их можно только по форме электронного облака, которая зависит от степени возбуждения атомов. Все невозбуждённые атомы одного и того же элемента неразличимы, как кирпичи из одной формы. Для атомов роль такой формы играют динамические законы квантовой механики, для всех них одинаковые и обязательные.

Портреты атома на рисунках отражают наш нынешний уровень знаний о нём. Это и есть современный образ атома, который заменил собой модели Демокрита, Томсона и Бора. Конечно, и теперешние «портреты» не следует понимать слишком буквально: это отнюдь не «фотографии атомов», подобные фотографиям колеблющейся струны. Ни простыми, ни сложными приборами мы не можем прямо измерить распределение электронной плотности внутри атома, потому что это неизбежно разрушит его (даже арбуз, чтобы проверить его качества, необходимо предварительно разрезать). И всё же у нас есть много оснований, чтобы верить найденной картине: с её помощью мы можем последовательно объяснить все опыты, которые привели нас к такому образу атома. Теперь нас не должно удивлять, что α -частицы в опытах Резерфорда беспрепятственно пролетали сквозь миллиарды

атомов, как через пустоту. Ведь пронизывающая кометные хвосты, Земля тоже никогда не отклоняется от своей орбиты. Понятен должен быть нам и механизм появления спектральных линий: просто атом скачком изменяет форму распределения электронного облака, излучая при этом квант энергии. Мы должны теперь понимать и причину расщепления спектральных линий в электрическом (эффект Штарка) и магнитном (эффект Зеемана) полях: электронное облако заряжено и различные его формы под воздействием полей немного изменяются, расщепляясь на близкие «подформы», а вместе с ними изменяется и энергия кванта, которую необходимо затратить, чтобы перевести облако из одной формы в другую, и длина волны спектральной линии, которая этому кванту соответствует. Используя уравнения квантовой механики, эти простые качественные рассуждения можно подтвердить точными расчётами и убедиться, что они совпадают с экспериментальными фактами.

Можно и дальше на основе новой модели атома продолжать анализ многочисленных опытов атомной физики. Но сейчас нам важнее понять другое: а почему мы уверены, что найденный нами образ атома соответствует истине?

Квантовая истина

Прежде всего, о какой истине пойдёт речь? И что понимают под истиной в квантовой механике? Если бы речь шла об арбузе, всё было бы просто. Например, мы бы сразу сказали, что знания одного только распределения плотности внутри арбуза недостаточно: это ещё далеко не вся правда о нём. Лишь когда мы увидим, потрогаем, съедим, наконец, арбуз, мы сможем сказать, что он собой на самом деле представляет. Но даже такое, по мнению большинства людей, полное знание

для людей науки весьма предварительно. Учёные начнут рассматривать арбуз под микроскопом и скажут, что он состоит из клеток. Немного позже они заявят, что клетки построены из молекул, а молекулы — из атомов... Круг замкнулся. Чтобы узнать до конца арбуз, мы снова должны ответить на вопрос: «Что такое атом?»

В действительности дело обстоит не так плохо: понятие «арбуз» сформировалось за много веков до появления всякой науки и не очень зависит от прошлых и будущих её достижений, поскольку опирается только на наши органы чувств. Это понятие может измениться лишь в том случае, если вдруг у всех людей одновременно появится ещё одно — шестое чувство. Полагая это нереальным, мы с лёгким сердцем можем сказать, что знаем об арбузе всё, если подвергли его испытанию своих пяти чувств. (Вспомните, как вы сами покупаете арбузы: сначала выбираете издали один из них, потом берёте его в руки, иногда подносите к уху, чтобы услышать лёгкий треск, и, наконец, надрезав его, пробуете на вкус.)

Можно ли с такой же меркой подходить к понятию «атом»? Ведь число опытов, на основе которых мы строим образ и понятие «атом», безгранично и, в принципе, каждый из них добавляет к нашим знаниям нечто новое. Мы не можем остановиться на этом пути и сказать: «Хватит с нас опытов, мы уже построили для себя образ атома, и дальнейшие опыты могут его только испортить». Наоборот, мы радуемся каждому новому опыту и особенно тем из них, которые не укладываются в рамки нами же придуманных схем. Именно такие опыты помогли нам отказаться от атомов — твёрдых шариков и найти для них более совершенный образ. Так почему же мы уверены теперь, что наш образ атома окончателен и полностью соответствует истине?

Надо признаться, что физики в этом вовсе не уверены. Зато они честно и с достоинством могут сказать: «За последние 100 лет не сделано ни одного опыта, который противоречил бы созданной нами картине. Поэтому лучше говорить не об её истинности, а об её плодотворности — о том, насколько она помогает нам объяснять и предсказывать особенности атомных явлений». И здесь выясняется поразительная вещь: нам не так уж необходимо знать, «как выглядит атом на самом деле». Нам достаточно изучить уравнения квантовой механики и правила обращения с ними. После этого мы можем предсказать всё: как изменится цвет тела при нагревании, какие спектральные линии оно при этом испустит и как изменится их частота, если поместить тело в электрическое или магнитное поле. Мы можем предсказать форму кристаллов, их теплоёмкость и электропроводность. Мы можем, наконец, построить атомную электростанцию и атомный ледокол — они будут работать. И всё это — без малейших ссылок на истинную форму атома.

На этом основании многие (с лёгкой руки Гейзенберга) предлагают обходиться в квантовой механике вообще без наглядных образов. Целесообразность такой крайности можно оспаривать, но отрицать её возможность безоговорочно нельзя. На вопрос: «Что такое атом?», — сторонники крайних мер отвечают лаконично: «Атом есть система дифференциальных уравнений». К сожалению, в этой шутке много правды. По сравнению с целым арбузом «атом арбуза» очень беден свойствами. Однако свойства эти противоречивы и слить их воедино без насилий над логикой и здравым смыслом можно только в уравнениях квантовой механики.

Квантовая механика — это математическая схема, позволяющая вычислять измеримые характеристики атом-

ных явлений. Если бы задача физики заключалась только в этом, то построение механики атома можно было бы считать законченным. Однако физика призвана дать нам нечто большее — рациональную картину мира. Выполнить столь обширную программу с одними формулами и числами нельзя, — для этого необходимо найти образы и сформулировать понятия, им соответствующие. Особенно важно это для

всех нефизиков, которые не знают и не понимают формул квантовой механики. Для них язык образов и понятий — единственный способ проникнуть вглубь атома. Со времён Демокрита мы продвинулись на этом пути довольно далеко и сейчас нарисовали для себя более или менее удовлетворительную картину атома. Однако до совершенства ей не хватает нескольких штрихов.

Вокруг кванта

Опыт Комптона



Представьте, что вы стоите перед зеркалом в зелёном свитере и вдруг замечаете, что ваше отражение в зеркале одето в красный свитер. Прежде всего вы, вероятно, протрете глаза, а если это не поможет, пойдёте к врачу. Потому что «так не бывает». В самом деле, зелёные лучи — это волны с длиной $\lambda=550$ нм. Встретив на пути препятствие — зеркало, они отражаются, но при этом никак не могут изменить свою длину и стать, например, красными ($\lambda = 650$ нм). А Комpton наблюдал именно это явление: направив на мишень пучок рентгеновских лучей с длиной волны λ , он обнаружил, что длина волны λ' рассеянных лучей больше длины волны падающих, то есть рассеянные лучи действительно «краснее» первоначальных!

Чудо это можно понять, если вспомнить гипотезу Эйнштейна о квантах света, которую он предложил для объяснения явлений фотоэффекта. Следуя ему, вместо рентгеновских волн с длиной λ и частотой $\nu = c/\lambda$ нужно представлять себе поток частиц-квантов с энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = h\nu/c$. Сталкиваясь с электронами атомов мишени, они выбивают их оттуда (затратив энергию P), разгоняют до скорости v (дополнительно затратив энергию $mv^2/2$), а сами рассеиваются с меньшей энергией $E' = h\nu'$, т.е. меньшей частотой ν' . В силу закона сохранения энергии

$$h\nu = h\nu' + P + \frac{mv^2}{2}.$$

Если атом полностью поглотит квант света ($E' = 0$), то мы увидим обычное явление фотоэффекта, а уравнение Комп-

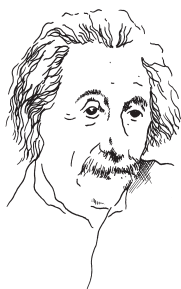
Чем фундаментальнее закономерность, тем проще её можно сформулировать.

Пётр Катица

тона превратится в уравнение Эйнштейна:

$$h\nu = P + \frac{mv^2}{2}.$$

Оба эти опыта можно провести в камере Вильсона, проследить путь каждого выбитого электрона и тем самым наглядно представить процесс столкновения световых квантов с электронами.



Эйнштейн

Но в таком случае, что нам мешает увидеть себя в красном свитере? Оказывается, всё те же квантовые законы, которые запрещают электрону поглощать произвольные порции энергии. Электрон на стационарной орбите в атоме может поглотить только такой квант, который либо перебросит его из одного стационарного состояния в другое (вспомните опыт Франка и Герца), либо выбросит его из атома (опыты Ленарда, Столетова, Милликена). Энергия «зелёных квантов» (2,5 эВ) слишком мала, чтобы вырвать электрон из атома ($P \approx 10$ эВ). Поэтому они упруго (без потери энергии) отразятся от атомов зеркала и при этом несколько не «покраснеют». Энергия рентгеновских волн ($\lambda \approx 1 \text{ \AA}$) примерно в 5—10 тысяч раз больше, и потому явления, которые с ними происходят, — иные. Например, они вовсе не отражаются от зеркала, а свободно через него проходят, срывая по пути электроны с его атомов.

Конечно, даже простой процесс отражения зелёного света от зеркала несколько сложнее, чем мы это сейчас представили. Но существует ещё одна — главная — трудность: в нашей стройной картине, где вместо волн света сплошь одни только кванты света, нет места опытам Фридриха, Книппинга и Лауэ, которые открыли дифракцию рентгеновских лучей и тем самым доказали их волновую природу. Как примирить эти несовместимые представления: лучи-волны и лучи-кванты? Квантовая механика справилась и с этой задачей.

Дифракция электронов

Как и многие открытия в физике, дифракция электронов была обнаружена во многом «случайно», хотя, как любил повторять Пастер, «случай говорит только подготовленному уму». В 1922 г. по заказу американской фирмы «Белл-телефон» Клинтон Джозеф Дэвиссон (1881—1958) и его сотрудник Кансмен изучали отражение электронных пучков от поверхности металлов и вдруг заметили какие-то аномалии. В 1925 г., после работ де Бройля, ученик Макса Борна Вальтер Эльзассер (1904—1991) предположил, что эти аномалии

Если хотите поколебать гипотезу — предоставьте ей полный простор.

Дени Дидро

Глубокие идеи похожи на чистые воды, прозрачность которых затемнена их же глубиной.

Клод Гельвеций

Всякий, кто удаляется от идеи, в конце концов остаётся при одних ощущениях.

Гёте

объясняются электронными волнами. Дэвиссон прочёл эту заметку, но не придал ей значения. В 1926 г. он приехал в Европу и показывал свои графики Макс Борну и Джеймсу Франку в Гёттингене, а также Дугласу Хартри в Оксфорде. Все они единодушно признали в них волны де Бройля, хотя и не убедили в этом Дэвиссона. Вскоре после его возвращения в Америку случилась авария на установке: лопнула вакуумная трубка и нагретый в это время кристалл при соприкосновении с кислородом воздуха изменил свою структуру. Эта досадная авария обернулась неожиданной удачей: после этого спектры отражённых электронов стали отчётливо напоминать спектры рассеянных рентгеновских лучей, в волновой природе которых тогда уже не сомневались. Продолжая свои опыты, Дэвиссон совместно с Лестером Халбертом Джермером (1896–1971) к концу 1927 г. убедился в реальности волн материи, связанных с электронами.

Дж. П. Томсон подошёл к проблеме с другой стороны. Он с самого начала относился к гипотезе де Бройля с большим сочувствием и вскоре после посещения Англии Дэвиссоном начал обдумывать способы доказать её на опыте. В Англии после работ Крукса и Дж. Дж. Томсона опыты с катодными лучами стали неперменным и привычным элементом образования. Быть может, поэтому Дж. П. Томсон прежде всего задумался: а нельзя ли приспособить их для новых опытов? Почти сразу же отыскалась подходящая готовая установка в Абердине, с которой работал студент Эндрью Рейд. (Он вскоре погиб в автомобильной катастрофе в возрасте 22 лет.) Уже через два месяца они получили на этой установке прекрасные фотографии дифракции электронов, которые в точности напоминали дифракцию рентгеновских лучей. Это было естественно, поскольку в их опытах электроны ускорялись потенциалом $V=150$ В (обычное напряжение городской сети). Длина волны таких электронов $\lambda \approx 1\text{Å} = 10^{-8}\text{см}$, то есть сравнима с длиной волны рентгеновских лучей и размерами атомов.

30 апреля 1897 г. Джозеф Джон Томсон (1856–1940) сделал в Королевском институте доклад о своих исследованиях свойств катодных лучей. При желании этот день можно считать днём рождения электрона — первой элементарной частицы в физике. По иронии судьбы, тридцать лет спустя, в мае 1927 г., его сын Джордж Паджет Томсон (1892–1975) доказал, что электрон — это волна.

И оба они правы, оба отмечены Нобелевской премией за свои открытия.



Двуликий Янус, Рим

Глава девятая

**Корпускулярно-волновой дуализм
Соотношение неопределённостей
Принцип дополнительности**

Вокруг кванта

**Дуализм и неопределённость
Древняя история принципа дополнительности
Вольфганг Эрнст Фридрих Паули**

В начале 20-х годов физики Макс Борн и Джеймс Франк и математик Давид Гильберт организовали в Гёттингене «Семинар по материи», на котором задолго до работ Гейзенберга и Шрёдингера стали употреблять термин «квантовая механика». В нём принимали участие и признанные в то время учёные, и знаменитая впоследствии молодёжь. Почти каждый семинар Гильберт начинал вопросом: «Итак, господа, подобно вам, я хотел бы, чтобы мне сказали точно — что такое атом?»

Сейчас мы знаем об атоме больше, чем все участники семинара тех лет, однако ответить Гильберту с полным знанием дела мы ещё не готовы. Нам известно теперь довольно много фактов из мира квантовой физики, но пока ещё недостаёт понятий, чтобы эти факты правильно истолковать.

Благодаря Нильсу Бору даже сейчас, много лет спустя, при слове «атом» непроизвольно на ум приходит именно «планетарный атом», то есть маленькая планетная система из ядра и электронов. Только потом усилием воли мы заставляем себя вспомнить, что атому присущи также и волновые свойства. Сейчас, как и прежде, обе идеи — «электрон-волна» и «электрон-частица» существуют в нашем сознании независимо, и невольно мы пытаемся от одной из них избавиться. «Частица или волна?» — к этому вопросу в 20-х годах физики возвращались постоянно: стремление к определённости заложено в человеке очень глубоко.

К весне 1926 г. в атомной физике сложилось любопытное положение: порознь и независимо возникли сразу две квантовые механики, исходные посылки кото-

рых резко различались. Гейзенберг вслед за Бором был убеждён, что электрон — это частица, и свои матричные уравнения написал в этом убеждении. Шрёдингер смог вывести свое дифференциальное уравнение, лишь поверив вместе с де Бройлем в волновые свойства электрона.

Гейзенберг требовал, чтобы в уравнения входили только те величины, которые можно непосредственно измерить на опыте: частоты спектральных линий и их интенсивности. На этом основании он исключил из теории понятие «траектория электронов в атоме» как величину принципиально ненаблюдаемую. Шрёдингер тоже не использовал понятия траектории, однако записал своё уравнение для ψ -функции, которая сама по себе измерена быть не может и физический смысл которой поначалу не был ясен никому, включая и самого Шрёдингера.

Опыт — последний судья во всех спорах — вначале решительно был на стороне матричной механики. В самом деле, из опытов Фарадея следовала неделимость электрического заряда, и дальнейшие опыты Крукса и Дж. Дж. Томсона определённо это доказали. Таким свойством может обладать только частица. Опыты Милликена и фотографии следов электрона в камере Вильсона устранили последние в этом сомнения. Но планетарный атом неустойчив, и представления об электроне-частице резко противоречили факту удивительной стабильности атома. Постулаты Бора были специально придуманы для того, чтобы обеспечить устойчивость атома при условии, что электрон — это частица.

Де Бройль и Шрёдингер пошли другим путём и показали, что наиболее естественно устойчивость атома можно объяснить, допустив, что электрон — это волна, а не частица. Эту гипотезу вскоре подтвердили прямыми опытами Дэвиссон,

Джермер и Дж. П. Томсон, обнаружив у электрона способность к интерференции и дифракции.

Опытам принято верить. Но как поверить сразу двум опытам, если они исключают друг друга? Возникшая ситуация имела примеры в истории физики и всё же была настолько необычна, что вначале никто не подозревал о единстве двух механик, а потому все стремились доказать истинность одной из них и ложность другой. Между сторонниками обеих теорий шли ожесточённые споры: одни отстаивали право первородства матричной механики, другие — предпочитали математическую простоту волновой. Конец этим спорам положил Шрёдингер в начале 1926 г., доказав, что обе механики *математически эквивалентны*. Для каждого физика это означало, что они эквивалентны также и физически, то есть перед нами одна и та же механика — *механика атома*, но записанная в разных формах. Это означало также, что верны исходные предпосылки обеих механик: представления матричной механики об электроне-частице и представления волновой механики об электро-не-волне.

Корпускулярно-волновой дуализм

В начале XX века, после открытия рентгеновских лучей шли ожесточённые споры об их природе: что это — очень короткие электромагнитные волны или поток очень энергичных «корпускул»? У каждой из сторон было достаточно аргументов и фактов для отстаивания своей точки зрения, но их было явно недостаточно, чтобы опровергнуть доводы и эксперименты противной стороны. Ещё в 1912 г., сразу после открытия Лауэ и за десять лет до опыта Комптона, Уильям Генри Брэгг (1862–1942) — активный участник этих споров, сформулировал кредо: «Проблема

не в том, чтобы выбрать из двух теорий рентгеновских лучей одну, а в том, чтобы построить теорию, которая совместила бы сильные стороны обеих точек зрения».

Чем больше учёные узнавали об атоме, тем менее категоричными становились вопросы, которые они задавали природе. Во времена Планка и Эйнштейна хотели знать: «Свет — это волна или поток частиц-квантов?» После работ де Бройля по-прежнему пытались выяснить: «Электрон — что это: волна или частица?» Лишь постепенно и с большим трудом оформилась простая мысль: «А почему или? Почему эти свойства, — волны и частицы, — должны исключать друг друга?» По здравом размышлении оказалось, что логических оснований для альтернативы «или—или» нет. А единственная причина, по которой от неё не отказывались, — всё та же инерция мышления, благодаря которой мы всегда пытаемся осмыслить новые факты с помощью старых понятий.

Существует ещё одна трудность — психологическая. В повседневной жизни мы привыкли, что предметы тем проще, чем они меньше. Например, из 33 матрёшек, вложенных одна в другую, самая маленькая — самая простая, бильярдный шар значительно проще шара земного, а целое всегда состоит из более простых частей. Когда, сидя у моря, Демокрит делил яблоко, он мог представлять себе атом каким угодно, но вряд ли ему приходило в голову, что он устроен сложнее, чем всё яблоко. Это и в самом деле не так. Но случается, что одни и те же свойства очевидны у малых предметов и совсем незаметны у предметов больших. Точно так же при дроблении вещества (которое мы по традиции мыслим себе построенным из частиц) у него не появляются новые, волновые свойства — они **проявляются**, просто раньше мы их не замечали.



С явлениями подобного типа мы сталкиваемся значительно чаще, чем сознаём это. Бильярдный шар и шар земной — прежде всего шары и этим похожи. Однако немало людей пострадало за эту истину, прежде чем Земля для всех стала шаром. А форма бильярдного шара не вызывала сомнений даже у отцов инквизиции. Всё дело в соотношении явления и наблюдателя. Земля — точно так же, как и каждый её электрон, — обладает свойствами волны. Однако, если попытаться описать её движение с помощью уравнения Шрёдингера, то при массе Земли $5 \cdot 10^{27}$ г и скорости $3 \cdot 10^6$ см/с, с которой она движется вокруг Солнца, придётся приписать этой «частице» волну де Бройля длиной в $4 \cdot 10^{-61}$ см — число настолько малое, что даже неизвестно, как его понимать. Однако мы не можем только на этом основании утверждать, что Земля не обладает волновыми свойствами. Ведь с помощью циркуля и линейки нельзя измерить её кривизну, но Земля всё-таки круглая...

Все эти примеры приведены здесь для того, чтобы легче понять конечный итог размышлений о проблеме «волна—частица»: вопрос «волна *или* частица?» неправильно поставлен: атомный объект — «и волна, и частица» одновременно. Более того, все тела в природе обладают одновременно и волновыми, и корпускулярными свойствами, и свойства эти — лишь различные проявления единого *корпускулярно-волнового дуализма*. К этой мысли пришли ещё в 1924 г. Бор, Крамерс и Слэтер. В совместной работе они с определённой заявляли, что «волновой характер распространения света, с одной стороны, и его поглощение и испускание квантами, с другой, являются теми экспериментальными фактами, которые следует положить в основу любой атомной теории и для которых не следует искать каких-либо объяснений».

Непривычное, но несомненное единство свойств «волна—частица» отражено в формулах Планка ($E=h\nu$) и де Бройля ($\lambda=h/mv$). Энергия E и масса m — характеристики частицы; частота ν и длина волны λ — признаки волнового процесса. А единственная причина, по которой мы не замечаем этого дуализма в повседневной жизни, — малость постоянной Планка h . Даже если это случайное обстоятельство, с ним надо считаться.

Если бы мы жили в мире, где значение постоянной Планка сравнимо с его привычными масштабами, наши представления об этом мире резко отличались бы от нынешних. Предметы в нём не имели бы определённых границ, их нельзя было бы двигать произвольно, и нельзя было бы заранее планировать встречи друзей. К счастью, этот мир — гипотетический, поскольку постоянную Планка мы не можем менять по своему произволу: она всегда неизменна и очень мала. Но атомы тоже очень малы, поэтому для них этот

необычный мир реально существует, и его непривычную логику нам предстоит теперь понять, — точно так же, как Гулливеру пришлось постигать образ мыслей лилипутов.

Соотношение неопределённостей

Предположим, что мы настолько прониклись идеей неделимости свойств «волна—частица», что захотели записать своё достижение на языке формул. Эти формулы должны установить соотношение между числами, которые соответствуют понятиям «волна» и «частица». В классической механике эти понятия строго разделены и относятся к совершенно различным явлениям природы. В квантовой механике корпускулярно-волновой дуализм вынуждает нас использовать оба понятия одновременно и применять их к одному и тому же объекту. Этот необходимый шаг не даётся даром, — мы за него должны платить, и, как оказалось, платить дорого.

Вполне ясно это стало в 1927 г., когда Вернер Гейзенберг догадался, что понятия «волна» и «частица» применительно к квантовым объектам можно определить строго только порознь, а при одновременном их использовании они имеют ограниченный смысл.

В физике слова «определить понятие» означают: «указать способ измерения величины, которая этому понятию соответствует». Гейзенберг утверждал: нельзя одновременно и при этом точно измерить координату x и импульс p квантового объекта. С учётом формулы де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

это означает: нельзя одновременно и в то же время точно определить положение x атомного объекта и соответствующую ему длину волны λ . Гейзенберг нашёл численную меру такого ограничения. Он показал,

что положение x и импульс p квантового объекта (например, электрона в атоме) мы всегда знаем с погрешностями Δx и Δp , и при этом не можем уточнять эти значения беспределённо, а лишь до тех пор, пока выполняется неравенство — *соотношение неопределённостей*:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2.$$

Этот предел мал, но он существует, и это — принципиально. Соотношение неопределённостей — строгий закон природы, который никак не связан с несовершенством наших приборов. Он утверждает: **нельзя** — **принципиально нельзя** — определить одновременно и координату, и импульс частицы точнее, чем это допускает неравенство $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$. Точно так же, как нельзя превысить скорость света или достичь абсолютного нуля температур. Нельзя, — как нельзя поднять самого себя за волосы или вернуть вчерашний день. И ссылки на всемогущество науки здесь неуместны: сила её не в том, чтобы нарушать законы природы, а в том, что она способна их открыть, понять и применить.

Нам это может показаться немного странным: мы привыкли к всесилию науки и утверждение «нельзя» молчаливо исключили из её лексикона. Замечательно, однако, что высший триумф любой науки достигается именно в моменты установления таких запретов. Когда сказали: «Невозможно построить вечный двигатель», — возникла термодинамика. Как только догадались, что «нельзя превысить скорость света», — родилась теория относительности. И лишь после того, как поняли, что различные свойства квантовых объектов нельзя измерить одновременно и с произвольной точностью, окончательно сформировалась квантовая механика.

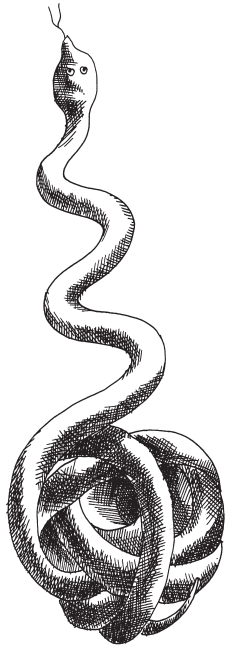
Причину инстинктивного сопротивления, которое мы испытываем при первом

знакомстве с соотношением неопределённостей, объяснил сам Гейзенберг. Для этого ему пришлось отбросить ещё одну идеализацию классической физики — понятие наблюдения: оказалось, что в квантовой механике его нужно пересмотреть — точно так же, как и понятие движения.

Подавляющую часть своих знаний о мире человек приобретает с помощью зрения. Эта особенность восприятия человека определила всю его систему познания: почти у каждого слово «наблюдение» вызывает в сознании образ внимательно глядящего человека. Когда вы смотрите на собеседника, то абсолютно уверены, что от вашего взгляда ни один волос не упадёт с его головы, даже если вы смотрите пристально и у вас «тяжёлый взгляд». В сущности, именно на этой уверенности основано понятие наблюдения в классической механике. Она выросла из астрономии, и, поскольку никто не сомневался, что, наблюдая звезду, мы никак на неё не воздействуем, то в этом не усомнились и в случае других наблюдений.

Понятия «явление», «измерение» и «наблюдение» тесно связаны между собой, но не совпадают. Древние наблюдали явления — в этом состоял их метод изучения природы. Из своих пристальных наблюдений они затем извлекали следствия с помощью чистого умозрения. По видимому, с тех пор укоренилась уверенность, что явление существует независимо от наблюдения.

Мы много раз подчёркивали главное отличие нынешней физики от античной: она заменила умозрение опытом. Теперешняя физика не отрицает, что явления в природе существуют независимо от их наблюдения — так же, как и от нашего сознания. Но она утверждает: явления становятся объектом наблюдения лишь тогда, когда мы укажем способ измерения их свойств. В физике понятия «наблюдение» и «изме-



рение» неразделимы. (Паули, как адвокат дьявола, спрашивал: «А возникновение мыслей о явлении — тоже явление?»)

Всякое измерение есть взаимодействие прибора и объекта, который мы изучаем. А всякое взаимодействие нарушает первоначальное состояние и прибора, и объекта, так что в результате измерения мы получаем о явлении сведения, которые искажены вмешательством прибора. Классическая физика предполагала, что все подобные искажения можно учесть и по результатам измерения восстановить «истинное» состояние объекта, независимое от измерений. Гейзенберг показал, что такое предположение есть заблуждение: *в атомной физике явление и наблюдение неотделимы друг от друга*. По существу, наблюдение — тоже явление, и далеко не

самое простое. Как и многое в квантовой механике, такое утверждение непривычно и вызывает бессознательный протест. И всё же попытаемся его понять или хотя бы почувствовать.

Ежедневный опыт убеждает нас: чем меньше объект, который мы исследуем, тем легче нарушить его состояние. Ничего меньше квантовых объектов — атома, электрона, ядра — мы в природе не знаем. Определить их свойства усилием воли мы не можем. В конечном итоге мы вынуждены измерять свойства этих объектов с помощью их самих. В таких условиях прибор неотличим от объекта. Но почему нельзя добиться, чтобы в процессе измерения один атомный объект лишь незначительно влиял на другой?

Дело в том, что оба они — и прибор, и объект — находятся в одном и том же квантовом мире и поэтому их взаимодействие подчиняется квантовым законам. А главная особенность квантовых явлений — их дискретность. В квантовом мире ничего не бывает чуть-чуть — взаимодействия там происходят только квантом: или — всё, или — ничего. Мы не можем как угодно слабо воздействовать на квантовую систему — до определённого момента она этого воздействия вообще не почувствует. Но коль скоро воздействие выросло настолько, что система готова его воспринять, — она скачком переходит в новое (тоже квантовое) состояние или же просто гибнет.

Процесс наблюдения в квантовой механике напоминает скорее вкус, чем зрение. «Для того чтобы узнать свойства пудинга, его необходимо съесть», — любили повторять создатели квантовой механики. И подобно тому, как, съев однажды пудинг, мы не в состоянии ещё раз проверить своё впечатление о его достоинствах, мы не можем беспредельно уточнять наши сведения о квантовой системе: её разру-

шит, как правило, уже первое измерение. Гейзенберг не только понял впервые этот суровый факт, но и сумел записать его на строгом языке формул.

Соотношение неопределённостей — одна из самых важных формул квантовой механики, в нём сконцентрированы её самые существенные особенности. После его открытия пришлось пересмотреть не только основы физики, но и теорию познания. Этот последний шаг оказался под силу лишь Нильсу Бору, который счастливо сочетал в себе могучий интеллект настоящего учёного и философский склад ума истинного мыслителя. В своё время он создал систему образов квантовой механики, теперь, четырнадцать лет спустя, он тщательно оттачивал систему её понятий. После Бора стало ясно, что и соотношение неопределённостей, и корпускулярно-волновой дуализм — лишь частные проявления более общего принципа — *принципа дополнителности*.

Принцип дополнителности

Принцип, который Бор назвал дополнителностью, — одна из самых глубоких философских и естественно-научных идей нашего времени, с которой можно сравнить лишь такие идеи, как принцип относительности или концепция физического поля. Его общность не позволяет свести его к какому-либо одному утверждению, им надо овладеть постепенно, на конкретных примерах. Проще всего (так поступил в своё время и Бор) начать с анализа процесса измерения импульса p и координаты x атомного объекта.

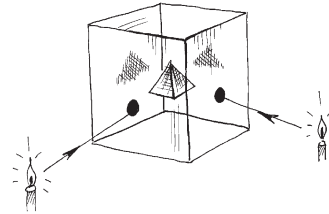
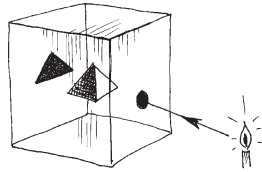
Нильс Бор обратил внимание на очень простой и понятный факт: координату и импульс атомной частицы нельзя измерить не только одновременно, но и с помощью одного и того же прибора. В самом деле, чтобы измерить импульс p атомной

частицы и при этом не очень сильно его изменить, необходим очень лёгкий подвижный «прибор». Но именно эта подвижность приводит к тому, что его положение весьма неопределённо.

Когда мы говорим в микрофон, то звуковые волны нашего голоса преобразуются там в колебания мембраны. Чем легче и подвижнее мембрана, тем точнее она следует за колебаниями воздуха. Но тем труднее определить её положение в каждый момент времени. Для измерения координаты x мы должны поэтому взять другой, очень массивный прибор, который не шелохнётся при попадании в него частицы. Но как бы ни изменялся в этом случае её импульс, мы этого даже не заметим. Это простейшая экспериментальная иллюстрация к соотношению неопределённостей Гейзенберга: нельзя в одном и том же опыте определить обе характеристики атомного объекта: координату x и импульс p . Для этого необходимы два измерения и два принципиально разных прибора, свойства которых дополнительны друг другу.

Дополнительность — вот то слово и тот поворот мысли, которые стали доступны всем благодаря Бору. И до него все были согласны, что несовместимость двух типов приборов влечёт за собой невозможность их одновременного использования, т.е. наблюдения свойств, изучаемых с их помощью. Бор отрицал такую прямолинейность суждений и разъяснял: да, свойства эти действительно несовместимы, но для полного описания квантового объекта оба они равно необходимы и поэтому не противоречат, а дополняют друг друга.

В действительности с такой ситуацией мы встречаемся повсеместно. Всем нам памятно детство, когда в солнечный день мы с помощью линзы поджигали бумагу и сухие былинки. Это одна характеристика солнечного луча: он несёт энергию



в виде фотонов. Но если тот же солнечный луч пропустить через призму, то мы увидим спектр. Это другая, дополнительная характеристика того же луча: он состоит из волн различной длины. Линза и призма — различные приборы, которые позволяют нам наблюдать различные физические явления, характеризующие разные, дополнительные свойства квантового объекта — света. Эти свойства нельзя наблюдать одновременно, в одном и том же опыте, с одним и тем же прибором, но они равно необходимы, чтобы представить себе сущность солнечного луча во всей его полноте.

Приведенное рассуждение о дополнительности двух несовместимых измерений можно пояснить ещё одной аналогией. Представьте, что вы хотите узнать содержимое «чёрного ящика», который устроен специальным образом, а именно наподобие хорошо известной камеры-обскуры. Эта камера, в отличие от обычной, имеет два отверстия в соседних стенках и, соответственно, два экрана на противостоящих отверстиям стенках ящика. Пока оба отверстия закрыты, мы ничего не знаем о предмете в ящике, он для нас попросту не существует. Открывая их поочерёдно, мы увидим на экранах две разные тени — проекции изучаемого предмета. Каждая из них, взятая в отдельности, недостаточ-

на, однако обе они равно необходимы для воссоздания объёмной картины изучаемого объекта.

Две различные проекции предмета соответствуют двум разным, дополнительным типам измерений в квантовой механике. Очевидно, что осуществить оба измерения одновременно мы не можем, поскольку при одновременном открывании отверстий в нашей камере-обскуре, кроме тени от предмета, создаваемой выбранным отверстием, на каждый из экранов попадёт свет от другого, «дополнительного» отверстия и оба изображения будут слегка испорчены. Ясно также, что если изучаемый объект очень мал, то уже при первом измерении-наблюдении мы нарушим его первоначальное состояние, например, сдвинем его или повернём. А это означает, что при открывании второго отверстия мы получим на другом экране не истинную, а искажённую проекцию предмета. В этих условиях объёмную картину можно восстановить лишь приблизительно, но это всё-таки лучше, чем хотя и резкое, но плоское изображение. Квантовая механика утверждает, что для воссоздания «объёмной картины» атомного объекта достаточно двух его «плоских проекций», то есть двух дополнительных измерений, например измерений координаты и импульса.

В переводе на язык абстрактных понятий предыдущие аналогии можно обобщить следующим образом. Квантовый объект — это «вещь в себе», пока мы не указали способа его наблюдения. Различные свойства объекта требуют разных, несовместимых способов наблюдения. В действительности понятия «объект» и «наблюдение» — лишь удобные абстракции, необходимые для описания более общего понятия «экспериментальная ситуация». Физическая наука изучает не объекты сами по себе, а конкретные реализации экспериментальной ситуации, которые мы называем «явлениями». С точки зрения опыта любое явление — это упорядоченный набор чисел, которые суть результаты измерений реакции объекта на воздействие прибора избранного типа. Выбирая разные, дополнительные приборы, мы меняем экспериментальную ситуацию; реализуя её, воздействуем на разные характеристики объекта; наконец, наблюдая следствия этого воздействия, мы получаем различные наборы чисел, то есть изучаем разные явления. И хотя дополнительные явления невозможно изучить одновременно, в одном опыте, тем не менее они характеризуют единый квантовый объект и равно необходимы для полной его характеристики.

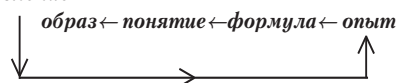
В действительности существенно даже не то, что измерительный прибор необратимо воздействует на квантовый объект, а то, что уже сам выбор типа прибора предопределяет свойства объекта, которые можно узнать с его помощью.

Всегда было важно, какие вопросы мы задаем природе. Задавая вопросы природе квантовой, мы должны быть особенно внимательны, ибо от их выбора зависит способ расчленения единой природы на две части: объект + наблюдатель. Принцип дополнительности утверждает, что существует по крайней мере два каче-

ственно различных способа такого расчленения.

В знакомой нам цепочке познания новейшей физики:

явление



принцип дополнительности сказывается прежде всего на системе понятий квантовой механики и на логике её умозаключений. Дело в том, что среди основных положений формальной логики существует «правило исключённого третьего», которое гласит: из двух противоположных высказываний одно истинно, другое — ложно, а третьего быть не может. В классической физике не было случая усомниться в этом правиле, поскольку там понятия «волна» и «частица» действительно противоположны и несовместимы по существу. Оказалось, однако, что в квантовой физике оба эти понятия одинаково хорошо применимы для описания свойств одних и тех же объектов, причём для полного описания необходимо использовать их одновременно. Учёные, воспитанные на традициях классической физики, восприняли эти требования как некое насилие над здравым смыслом и поговаривали даже о нарушении законов логики в атомной физике. Бор объяснил, что дело здесь вовсе не в законах логики, а в той беспечности, с которой, без всяких оговорок, используют классические понятия для объяснения квантовых явлений. А такие оговорки необходимы, и соотношение неопределённостей Гейзенберга

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

— запись этого требования на языке формул.

Причина несовместимости дополнительных понятий в нашем сознании глубока, но объяснима. Дело в том, что



познать атомный объект непосредственно, с помощью наших пяти чувств, мы не можем. Вместо них мы используем довольно сложные приборы, которые изобретены сравнительно недавно. Для объяснения результатов опытов нам нужны слова и понятия, а они появились задолго до квантовой механики и никоим образом к ней не приспособлены. Однако мы вынуждены ими пользоваться, — у нас нет другого выхода: язык и все основные понятия мы усваиваем значительно раньше, чем узнаем о существовании физики.

Принцип дополнительности Бора — удавшаяся попытка примирить ограниченность устоявшейся системы понятий

с прогрессом наших знаний о мире. Этот принцип расширил возможности нашего мышления, объяснив, что в квантовой физике меняются не только понятия, но и сама постановка вопросов о сущности физических явлений. (Паули одно время даже предлагал назвать квантовую механику «теорией дополнительности» — по аналогии с теорией относительности.) Но значение принципа дополнительности выходит далеко за пределы квантовой механики, где он возник первоначально. Лишь позже — при попытках распространить его на другие области науки — выяснилось его истинное значение для всей системы человеческих знаний. Можно спорить о правомерности такого расширения, но нельзя отрицать его плодотворности во многих случаях, даже далеких от физики. (Паули, например, считал, что «сознательное» и «бессознательное» — дополнительные свойства человеческой психики и они подвержены взаимному влиянию в процессе формулировки понятий и принятия решений.)

Сам Бор любил приводить пример из биологии, связанный с жизнью клетки, роль которой вполне подобна значению атома в физике. Если атом — последняя частица вещества, ещё сохраняющая его свойства, то клетка — это самая малая часть любого организма, которая всё ещё представляет жизнь в её сложности и неповторимости. С точки зрения науки изучить жизнь клетки — значит узнать все элементарные процессы, в ней происходящие, и при этом понять, как их взаимодействие приводит к совершенно особому состоянию материи — к жизни.

При попытке выполнить эту программу оказывается, что одновременное сочетание такого анализа и синтеза невозможно. В самом деле, чтобы проникнуть в детали механизма жизнедеятельности клетки, мы рассматриваем её в микроскоп, — сначала обычный, затем

электронный, — нагреваем клетку, пропускаем через неё электрический ток, облучаем, разлагаем на составные части... Но чем пристальнее мы станем изучать жизнь клетки, тем сильнее будем вмешиваться в её функции и в ход естественных процессов, в ней протекающих. В конце концов мы её разрушим и поэтому ничего не узнаем о ней как о целостном живом организме. Тем не менее ответ на вопрос «Что такое жизнь?» требует и анализа, и синтеза одновременно. Процессы эти несовместимы, но не противоречивы, а дополнительные, и необходимость учитывать их одновременно — лишь одна из причин, по которой до сих пор не существует ответа на вопрос о сущности жизни.

Часто говорят, что правильно поставленный вопрос — уже половина ответа, и это не просто эффектный афоризм. Правильно поставленный вопрос — это вопрос о тех свойствах явления, которые у него действительно есть. Поэтому он уже содержит в себе все понятия, которые необходимо использовать в ответе. На идеально поставленный вопрос можно ответить коротко: «да» или «нет». Бор показал, что вопрос «волна или частица?» в применении к атомному объекту неправильно поставлен. Таких раздельных свойств у атома нет, и потому он не имеет однозначного ответа «да» или «нет». Точно так же, как нет ответа на вопрос «Что больше: метр или килограмм?» и на другие подобные вопросы.

Квантовый объект — это не частица и не волна, и даже ни то и другое одновременно. Квантовый объект — это *нечто третье*, не равное простой сумме свойств волны и частицы, точно так же, как мелодия — больше, чем сумма составляющих её звуков, а кентавр — не простая сумма коня и человека, а нечто качественно новое. Это квантовое «нечто» не дано нам в ощущении, и тем не менее оно, безусловно, реально. У нас нет образов и орга-

нов чувств, чтобы вполне представить себе свойства этой реальности. Однако сила нашего интеллекта, опираясь на опыт, позволяет всё-таки её познать. Два дополнительных свойства квантовой реальности нельзя разделить, не разрушив при этом полноту и единство явления природы, которое мы называем атомом, точно так же, как невозможно разрезать на две части кентавра, сохранив при этом в живых и коня, и человека.

Когда Гейзенберг отбросил идеализацию классической физики — понятие «состояние физической системы, независимое от наблюдения», он тем самым предвосхитил одно из следствий принципа дополнительности, поскольку «состояние» и «наблюдение» — дополнительные понятия. Взятые по отдельности, они неполны и поэтому могут быть определены только совместно, друг через друга. Говоря строго, они вообще не существуют порознь: мы всегда наблюдаем не вообще нечто, а непременно какое-то состояние. И наоборот: всякое состояние — это «вещь в себе» до тех пор, пока мы не найдём способ его наблюдения. (Только в религиозном сознании явление и наблюдение, объективное и субъективное неразделимы и неразличимы.)

Сами по себе понятия «волна» и «частица», «состояние» и «наблюдение» суть некие классические идеализации, равно необходимые для понимания квантового мира. Эти идеализации дополнительные в том смысле, что для полного описания сущности квантовых явлений необходимо их гармоническое сочетание. Однако в рамках привычной логики они могут сосуществовать без противоречий лишь в том случае, если области их применимости взаимно ограничены.

Много размышляя над этими и другими похожими проблемами, Бор пришёл к выводу, что это не исключение, а общее

правило: *всякое истинно глубокое явление природы не может быть определено однозначно с помощью слов нашего языка и требует для своего определения по крайней мере двух взаимоисключающих дополнительных понятий*. Это означает, что при условии сохранения нашего языка и привычной логики мышление в форме дополнительности ставит пределы точной формулировке понятий, соответствующих истинно глубоким явлениям природы. Такие определения либо однозначны, но неполны, либо полны, но тогда неоднозначны, поскольку включают в себя дополнительные понятия, несовместимые в рамках обычной логики. К таким понятиям относятся понятия «жизнь», «квантовый объект», «физическая система» и даже само понятие «познание природы».

С давних пор известно, что наука — это лишь один из способов изучить окружающий мир. Другой, дополнительный способ воплощён в искусстве. Само совместное существование искусства и науки — одна из иллюстраций принципа дополнительности. Можно полностью уйти в науку или всецело жить искусством, —

оба эти подхода к жизни одинаково правомерны, хотя, взятые по отдельности, и не полны. Стержень науки — логика и опыт. Основа искусства — интуиция и прозрение. Но искусство балета требует математической точности, а «вдохновение в геометрии столь же необходимо, как и в поэзии». Они не противоречат, а дополняют друг друга: истинная наука сродни искусству, — точно так же, как настоящее искусство всегда включает в себя элементы науки. В высших своих проявлениях они неразличимы и неразделимы, как свойства «волна—частица» в атоме. Они отражают разные, дополнительные стороны человеческого опыта и лишь взятые вместе дают нам полное представление о мире. Неизвестно только «соотношение неопределённостей» для сопряжённой пары понятий «наука—искусство», а потому и степень ущерба, который мы терпим при одностороннем восприятии жизни.

Конечно, приведённая аналогия, как и любая аналогия, и неполна, и нестрога. Она лишь помогает почувствовать единство и противоречивость всей системы человеческих знаний.

Вокруг кванта

Дуализм и неопределённость



В пору становления квантовой механики физики с горечью шутили, что теперь им приходится по понедельникам, средам и пятницам представлять электрон частицей, а в остальные дни — волной. В 1924 г. Нильс Бор с присущим ему юмором говорил: «Даже если Эйнштейн пришлёт мне телеграмму с сообщением об окончательном доказательстве реальности световых квантов, то и тогда она дойдёт до меня только благодаря существованию радиоволн».

«Это в высшей степени парадоксально и способно привести в замешательство, — писал Дэвиссон в своей знамени-

Те, кто знает истину, отличаются от тех, кому она нравится, а те, кто предпочитают её, не всегда находят в ней удовольствие.

Китайская пословица

той статье 1928 г. с характерным названием «Существуют ли электронные волны?» — Мы должны поверить не только в то, что в определённом смысле кролики суть кошки, но также в то, что в некоем смысле кошки суть кролики».

Такой способ мышления приводил к множеству парадоксов, от которых мы будем избавлены, если сразу же заставим себя не разделять в электроны свойств «волна—частица». Только после этого соотношение неопределённостей Гейзенберга перестанет быть чем-то странным и превратится в простое следствие корпускулярно-волнового дуализма.

В волновой оптике давно знали, что ни в какой микроскоп нельзя разглядеть частицу, если её размеры меньше, чем половина длины волны света, которым она освещена. В этом не видели ничего странного: волны света существуют сами по себе, частица — сама по себе. Но когда выяснилось, что частице тоже можно приписать длину волны, тогда это утверждение волновой оптики превратилось в соотношение неопределённостей: частица не может быть локализована точнее, чем половина длины её волны.

Древняя история принципа дополнительности

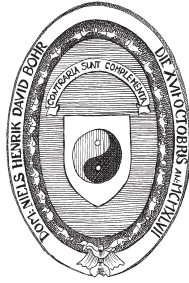
Сам по себе принцип дополнительности, взятый вне физики, — изобретение древнее. По существу, это довольно известная категория диалектической логики и в разных видах она неоднократно формулировалась различными философами во все времена. Аристотель говорил, например, что «гармония — это смешение и сочетание противоположностей», а за тысячу лет до него в Древнем Китае возникла философия Дао, целиком основанная на принципе дополнительности (её символ «инь-янь» помещён на предыдущей странице).

Любопытно вспомнить, как принцип дополнительности переоткрыли для себя поэты. В 1901 г. Валерий Брюсов написал статью под названием «Истины», в которой мы читаем следующее: «Для мышления нужна множественность... Не было бы пространства, не будь правого и левого; не было бы нравственности, не будь добра и зла... В истине ценно лишь то, в чём можно сомневаться... Мало того, ценная истина непременно имеет прямо противоположную, соответствующую ей истину; иначе сказать — суждение, прямо противоположное истине, в свою очередь истинно...»

Истина редко бывает чистой, и никогда — однозначной.

Оскар Уайльд

Уместно вспомнить здесь и Паскаля, который в своё время писал: «Все принципы пирронистов, стоиков, атеистов и т.д. истинны, но их заключения ложны, потому что и противоположные принципы тоже истинны».



Герб Бора

Что дополнительно понятно истине? Ответ: ясность.

Нильс Бор

Знаменательно, что многие из этих утверждений почти дословно предвосхищают формулировки Бора. Не все знают, что и Бор пришёл к своему принципу дополнительности не «от физики», а «от философии». Идея дополнительности созрела в нём ещё в юношеские годы под влиянием философии Кьеркегора. В дальнейшем она крепла и уточнялась, пока не нашла, наконец, достойного применения в квантовой физике.

В 1937 г. Нильс Бор впервые посетил Китай и там узнал, что на самом деле принципу дополнительности две с половиной тысячи лет. Он был настолько поражён учением даосизма, что когда десять лет спустя ему было пожаловано дворянское достоинство, он избрал для своего герба символ *тайцзи*, символизирующий в учении Дао дополнительное единство противоположных сущностей *инь* и *янь*. И пояснил его изречением на латыни *Contraria sunt complementa* — противоположности дополнительные.

Вольфганг Эрнст Фридрих Паули

В истории квантовой физики Паули занимает особое место, которое в период её становления было особенно значительным. Вся плеяда молодых создателей новой физики признавала его безусловный авторитет, и в жарких спорах того времени они обращались к нему как к верховному арбитру. «Если Паули согласен, то всё в порядке», — говорил в то время Гейзенберг, а много лет спустя вспоминал: «Он всегда знал всё обо всём». Оба они прошли школу Зоммерфельда и до конца жизни сохранили дружбу тех юных дней. Ему первому Гейзенберг сообщил о своём открытии, а своего сына назвал Вольфгангом — в честь Паули. За жёсткость оценок и беспощадный ум друзья прозвали Паули Мефистофелем, а Эренфест называл его «бич божий» и в письмах обращался к нему «дорогой и ужасный Паули».

Уравнение Паули, матрицы Паули, принцип Паули, теорема Паули — любого из этих достижений достаточно, чтобы сохранить его имя в истории физики. Но кроме этого были ещё: гипотеза нейтрино, связь спина со статистикой, объяснение Периодической системы элементов, ядерный спин и сверхтонкая структура спектров, аномальный магнитный момент и парамагнетизм электронного газа, работы по квантовой теории поля... Уже в 1927 г. совместно с Йорданом и Гейзенбергом он согласовал с требованиями теории относительности квантовую теорию излучения, предложенную Дираком, которая двадцать лет спустя достигнет



Паули

впечатляющих результатов и станет известной под именем *квантовая электродинамика*.

Всеобщее признание его выдающегося вклада в науку было отмечено Нобелевской премией «За открытие принципа запрета, называемого также принципом Паули» только в 1945 г. Но учёное сообщество и до этого хорошо представляло себе масштаб его личности: Эйнштейн на склоне лет видел его своим преемником на посту директора Института высших исследований в Принстоне (его отзыв о работах Паули стал, по-видимому, решающим и для Нобелевского комитета).

Вольфганг Паули родился в семье врача и физиолога в один год с гипотезой Планка. Всё его детство прошло в профессорской среде, его отец был дружен со знаменитым физиком и философом Эрнстом Махом (1838–1916), который стал крестным отцом Вольфганга и дал ему второе имя. Паули рос типичным вундеркиндом: в свои 11 лет он уже помогал учителю математики вести занятия в классе, а в 18 лет опубликовал свою первую научную работу по единой теории гравитации и электромагнитного поля. Зоммерфельд сразу оценил его выдающийся научный потенциал и буквально заставил двадцатилетнего студента написать для энциклопедии обзор по теории относительности, который и до сих пор остаётся одним из лучших её изложений.

После окончания университета в 1921 г. Паули работал в Гёттингене ассистентом Макса Борна, но лекции Нильса Бора летом 1922 г., по его собственному признанию, изменили его жизнь и уже осенью 1922 г. он уезжает к нему в Копенгаген. Паули очарован Бором, и Гейзенберг, который становится вместо него ассистентом Борна, с лёгким недовольством пишет Зоммерфельду: «Паули стал слишком **бороподобным**». (Два года спустя он тоже присоединится к выдающемуся сообществу юных учеников Бора, которое так много сделало для становления квантовой физики.)

В Копенгагене Паули погрузился в интернациональную среду талантливой молодёжи и напряжённую атмосферу научных поисков того времени, когда почти каждый месяц приносил важные открытия. Напряжение тех лет разрешилось объяснением аномального эффекта Зеемана и структуры Периодической системы элементов, на пути к которому Паули первым из современников догадался, что кроме классических характеристик электрона (координата, масса, энергия, импульс), которые определены в трёхмерном пространстве, ему присуща ещё одна — *спин*, или, как он тогда

*Каждая вещь в этом мире
частью истинна, частью
ложна... Ничто не бывает
безусловно истинным.*

Блез Паскаль

*Каждому рассуждению
противостоит равно-
сильное.*

Протагор

*Почти каждому мудрому
изречению соответ-
ствует противоположное по
смыслу — и при этом не
менее мудрое.*

Джордж Сантаяна

говорил, *неклассическая двузначность электрона* — свойство, наглядное представление которого невозможно.

Эта привычная теперь идея вначале не была столь очевидной: даже могучему интеллекту Паули потребовалось два года, чтобы, наконец, сформулировать эту гипотезу, которая была столь необычной, что его друзья и коллеги вначале не приняли её всерьёз. Гейзенберг получил рукопись Паули в канун Рождества 1924 г. и был глубоко разочарован: он сам в течение трёх лет тщетно пытался разгадать загадку аномального эффекта Зеемана и полагал, что такая прямолнейная попытка его объяснения недостойна гения Паули. Он тут же написал ему открытку: «Сегодня я прочёл твою новую работу и, без сомнения, я один из тех, кто больше всех ей рад. И не только потому, что ты поднял надувательство на немыслимую, головокружительную высоту (введя **индивидуальные** электроны с 4 степенями свободы) и тем самым превзошёл все предыдущие рекорды, за которые упрекал меня, но, главным образом, я торжествую потому, что ты (*и ты, Брут*) с поникшей головой пришёл в страну педантов формализма; не грусти, там тебя примут с распростёртыми объятьями. Но если ты думаешь, что написал что-то против уже известных надувательств, то ты заблуждаешься: произведение надувательство × надувательство не приводит к правильному результату и два надуательства никогда не противоречат друг другу. Итак, я тебя поздравляю!!!! Счастливого Рождества!»

Однако люди неискушённые, такие как Ральф Крониг (1904–1995), который только что приехал из Америки для стажировки в лабораториях Европы, восприняли идею Паули с энтузиазмом. Уже в начале января 1925 г. Крониг принял расчёты дублетного расщепления термов, основанные на представлении о вращающемся электроны со своим собственным магнитным моментом, и рассказал о них Паули. «Несомненно, это остроумная идея, но Природа недостаточно хороша для неё», — ответил ему Паули в своей обычной манере. Попытку Кронига осудили также и Гейзенберг, и Крамерс, к тому же сам он довольно быстро выяснил, что скорость вращения на поверхности такого «электронного волчка» многократно превышает скорость света, и Крониг так и не решился опубликовать свои вычисления. (После статьи Уленбека и Гаудсмита научная молодёжь сочинила стишок: «Крониг открыл бы спин, если бы Паули его не напугал». А Хиллет Томас, работа которого в конечном итоге вынудила Паули признать их гипотезу (хотя вначале он и убеждал Бора воспрепятствовать её публикации), писал

Глубокая истина — это такая истина, которая настолько глубока, что противоположная ей истина также истинна.

Нильс Бор

Гаудсмит: «Вам с Уленбеком повезло, что вы опубликовали свою статью о вращающемся электро́не до того, как Паули узнал об этом... Непогрешимость Бога не распространяется на тех, кто назначил себя Его наместником на Земле».)

Только мудрый Бор уже тогда подозревал, что гипотеза Паули — это не просто остроумный трюк, придуманный для объяснения частной задачи, а «может быть, решающий поворотный пункт» и выход за рамки тогдашних квантовых идей (именно тогда он сформулировал своё знаменитое кредо: «Теория достаточно безумна, чтобы быть истинной»). Через три года Поль Дирак объяснит, что спин — это вестник из четвёртого измерения теории относительности.

Постепенно понятие спина стало одним из самых важных в структуре квантовой физики. Оказалось, что спин необходим для объяснения химической связи атомов в молекулах и явлений магнетизма, протонно-нейтронной структуры ядра и кристаллов, природы сверхпроводимости и стабильности материи. Кроме того, Паули доказал также, что симметрия волновых функций квантовой системы, а также тип статистического распределения её частиц по энергиям однозначно определяются значениями их спина. А в 1954 г. будет доказана знаменитая *CPT*-теорема, лежащая в основе всей современной теории элементарных частиц.

Паули был, конечно, прав, решительно отвергая наглядные представления о вращающемся электро́не. Только через много лет станет ясно, что спин — это первый представитель многообразных *внутренних* свойств *элементарных частиц*, смысл которых станет много понятнее после появления гипотезы *кварков* и теории *калибровочных полей*.

Перед Рождеством 1930 г. Паули снова удивит своих друзей: он станет утверждать, что спин может существовать отдельно от массы и заряда — подобно улыбке Чеширского кота — и снова окажется прав. (Он сообщит об этой идее в письме к Лизе Мейтнер и Отто Гану, который ровно через 9 лет, в канун Рождества 1939 г. откроет деление ядра урана.) Этот бесплотный носитель чистого спина будет обнаружен только четверть века спустя и известен теперь под именем *нейтрино*.

В начале 1928 г. Паули сменил Дебая на посту главы физического департамента знаменитой Высшей технической школы Цюриха, в которой в свое время учились Борн и Эйнштейн и преподавали Минковский и Вейль. Его первым ассистентом стал Ральф Крониг, а среди 11, сменивших его, были Феликс Блох, Рудольф Пайерлс, Хендрик Казимир, Виктор Вайскопф, Маркус Фирц, Пауль Шеррер, Валентин

Каждое поколение считает себя более умным, чем предыдущее и более мудрым, чем, последующее.

Джордж Оруэлл

Ум, состоящий из одной только логики, подобен ножу без рукоятки: он ранит в кровь руку, берущую его.

Рабиндранат Тагор

Не объясняют неизвестное через непонятное.

Лоренцо Валла

Баргман, — все они впоследствии стали известными учёными. В это же время под его началом работал и молодой Роберт Оппенгеймер, который 15 лет спустя возглавит команду, создавшую первую атомную бомбу. (Летом 1930 г. к Паули приезжали из России Лев Ландау и Георгий Гамов, а ассистент Паули, Рудольф Пайерлс, вскоре женился на подруге их студенческих лет Жене Канегиссер.) Войну Паули пережил в Принстоне и только в 1945 г. возвратился в Цюрих. Ему (как и Гейзенбергу) предлагали возглавить ЦЕРН — знаменитый Европейский центр физических исследований, но он отказался и предпочёл сосредоточиться на размышлениях о сути таинственного процесса научного творчества.

О смысле новых понятий, которые принесла с собой квантовая физика, напряжённо думали все её создатели, но Паули и здесь пошёл дальше других: он стремился понять механизм их возникновения и дойти до той таинственной зыбкой границы, которая разделяет и связывает зримые знаки явлений и их логическое отображение в нашем сознании. Паули надеялся, что эту тайну можно постигнуть, опираясь на принцип дополнительности, и пытался определить словами ту неуловимую грань между бессознательным восприятием явления и его сознательной реконструкцией, балансирование на которой и составляет истинную суть процесса познания. Четверть века он состоял в интенсивной переписке со знаменитым Карлом Юнгом (1875—1961), который пытался проникнуть в эту тайну со стороны психофизиологии человека, и в конце жизни они вместе издали книгу «Объяснение природы и психология» (*Naturklärung und Psyche*: как вспоминал впоследствии Юнг, «мы вместе бродили по безлюдной пустыне между физикой и психологией бессознательного»).



Анубис, Египет

Глава десятая

**Игра «орёл—решка» и стрельба в тире
Дифракция электронов
Волны вероятности
Электронные волны
Амплитуда вероятности и суперпозиция состояний
Атом и вероятность
Вероятность и спектры атомов
Причинность и случайность
Вероятность и достоверность**

Вокруг кванта

Люди, события, кванты

Представьте себе, что где-то в поезде между Новосибирском и Красноярском вы познакомились с девушкой. Теперь вообразите, что год спустя вы случайно встречаете её в Москве у кинотеатра «Россия». Как бы вы ни были рады встрече, – прежде всего она вызовет у вас удивление: вы ведь знаете, насколько такое событие *маловероятно*.

Мы постоянно употребляем слова «вероятно», «вероятнее всего», «по всей вероятности», «невероятно», не отдавая себе отчёта, насколько строго определены понятия, им соответствующие. В науке такое положение недопустимо, поэтому там понятие «вероятность» имеет смысл лишь

в том случае, если мы можем её *измерить* или *вычислить*.

Это не всегда просто. Например, предсказать вероятность возможной встречи с вашей случайной знакомой двенадцать лет спустя на центральном телеграфе в Москве довольно трудно: слишком сложны законы, управляющие действиями людей. Поэтому во всех учебниках с завидным постоянством объясняют законы случая на примере бросания монеты.

Игра «орёл—решка» и стрельба в тире

Математическое понятие вероятности возникло как ответ на стремление придать

единичному субъективному ожиданию статистически объективный смысл.

Любое *событие*, вероятность которого мы хотим определить, является одним из *исходов* некоторой серии *испытаний*. Условимся: если какое-либо испытание имеет несколько исходов, то полная вероятность произойти хоть какому-то из них равна *единице*. Это условие ниоткуда не следует, но оно общепринято, и мы тоже не станем изменять традиции. Поэтому слова «событие произойдёт с вероятностью единица» означают, что оно произойдёт наверняка.

Отсюда ясно также, что вероятность какого-то одного исхода всегда меньше единицы. В примере с монетой каждое испытание — бросание монеты — имеет только два исхода: она может упасть либо гербом вверх (орёл), либо гербом вниз (решка). (Мы исключаем неправдоподобно редкие случаи, когда монета при падении останется стоять на ребре.) Если монета сделана без хитростей, то оба исхода бросания *равновероятны*. Отсюда просто заключить, что вероятность монете упасть гербом вверх равна $1/2$. Столь же легко вычислить вероятность появления, скажем, 3 очков при бросании игральной кости: очевидно, она равна $1/6$. Число аналогичных примеров каждый легко умножит сам, но все они во многом похожи:

во-первых, каждое последующее испытание (бросание кости или монеты) не зависит от предыдущего;

во-вторых, результат каждого испытания есть *случайное событие*, то есть мы не знаем (или не можем учесть) всех причин, которые приводят к тому или иному исходу события.

Последнее особенно важно. В самом деле, монета — не атом, и её движение подчиняется хорошо известным законам классической механики. Используя их, мы можем заранее предвидеть все детали

движения монеты и предсказать, как она упадёт: гербом вверх или вниз. Мы можем даже нарисовать траекторию её движения. Конечно, это очень трудно: нужно принять во внимание сопротивление воздуха, форму монеты, упругость пола, на который она упадёт, и ещё много других важных мелочей. И, самое главное, для этого необходимо точно задать *начальное положение и скорость монеты*.

Однако учесть все мыслимые причины, влияющие на исход испытания, не всегда возможно. Например, в случае с монетой мы никогда не знаем достаточно точно её начального положения и скорости. А всякое, даже очень небольшое их нарушение может изменить результат бросания на противоположный. И тогда уже нельзя быть уверенным, что при *этом* бросании выпадет орёл. Можно только сказать: при *любом* бросании вероятность появления герба равна $1/2$.

Простые примеры, которые мы привели, не объясняют пока, почему так важно понятие вероятности в квантовой механике. Но прежде чем это станет ясным, познакомимся хотя бы бегло с основными законами теории вероятностей. Законы случая (несмотря на странное сочетание этих слов) — такие же строгие, как и все другие законы математики. Однако они имеют некоторые непривычные особенности и вполне определённую область применимости. Например, можно легко проверить, что при большом числе бросаний герб выпадет примерно в половине случаев и закон этот выполняется тем точнее, чем больше испытаний мы проведём. Тем не менее это знание не поможет нам предсказать исход каждого отдельного бросания монеты. В этом и состоит главная особенность законов случая: понятие вероятности применимо к *отдельному* событию и мы можем *вычислить* заранее число, которое этому понятию соответствует.

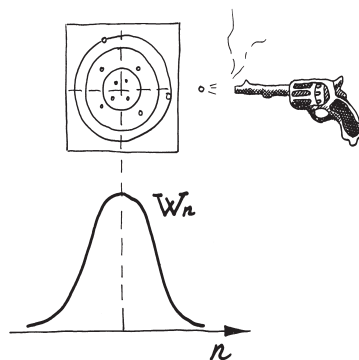
Однако *измерить* его можно только при *многократном* повторении *однотипных* испытаний.

Очень важно, чтобы испытания были действительно однотипными, то есть полностью неразличимыми, поскольку только тогда измеренное число-вероятность можно использовать для характеристики каждого отдельного случайного события, которое является одним из возможных исходов испытания.

Непривычные особенности законов случая имеют естественное объяснение. В самом деле, бросание монеты — очень непростой процесс. Мы не хотим или не можем изучить его во всей сложности и стремимся узнать только конечный результат испытания. Такое пренебрежение к деталям процесса не проходит даром: теперь достоверно мы можем предсказать только усреднённый результат многочисленных однотипных испытаний, а для каждого отдельного случайного события мы в состоянии указать лишь вероятный его исход.

Широко бытует заблуждение, что вероятностное описание движения менее полно, чем строго причинное, классическое, с его понятием траектории. С точки зрения классической механики это действительно так. Однако, если мы откажемся от части её жёстких требований (например, от знания начальных координат и импульсов частиц), то классическое описание становится сразу же бесполезным. На смену ему приходит вероятностное описание, и в новых условиях оно будет столь же исчерпывающим, поскольку сообщает нам все сведения о системе, которые можно узнать о ней с помощью опыта.

При игре «орёл–решка» мы намерены не хотим знать начальное положение и скорость монеты и целиком полагаемся на волю случая. Наоборот, приходя в тир, мы всегда стремимся попасть в центр ми-



шени. Но, несмотря на это — достаточно сильное — желание, мы никогда заранее не знаем, в какое место мишени попадёт каждая из пуль. После стрельбы отверстия в мишени группируются в довольно правильный овал, который принято называть «эллипсом рассеяния». Его форма зависит от многих причин.

Для того чтобы все пули попадали всегда в одну и ту же точку мишени, необходимо им всем в момент вылета иметь одни и те же начальные координаты x_0 и скорости v_0 (или импульсы p_0). А это возможно лишь в том случае, если вы целитесь безошибочно и, кроме того, заряд пороха во всех патронах в точности одинаков. Ни то, ни другое обычно не достижимо. Поэтому распределение отверстий от пуль на мишени всегда подчиняется законам случая, и можно говорить лишь о вероятности попадания в «десятку» или «девятку» мишени, но никогда нельзя быть уверенным в этом заранее.

Как и при игре «орёл–решка», эту вероятность можно измерить. Допустим, мы произвели 100 выстрелов и 40 раз попали в «десятку», 30 раз — в «девятку», 15 — в «восьмёрку» и так далее — до нуля. Тогда вероятности попадания в «десятку»,

«девятку», «восьмёрку» и т.д. соответственно равны

$$W_{10}=40/100=0,4, W_9=0,3, W_8=0,15 \text{ и т.д.}$$

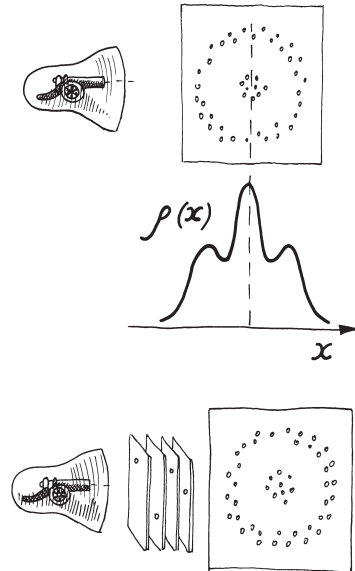
Можно даже построить диаграмму эллипса рассеяния, отложив по горизонтали числа 10, 9, 8, ..., а по вертикали — вероятности попадания в соответствующие им области мишени.

Если мы возьмём теперь точно такую же мишень и вновь 100 раз по ней выстрелим, то расположение отверстий на ней будет совсем другим, чем на первой мишени. Но число попаданий в «десятку», «девятку» и т.д. останется примерно тем же самым, а следовательно, и диаграмма эллипса рассеяния также останется без изменений. Конечно, для разных стрелков диаграммы различны: для опытного стрелка она уже, для неопытного — шире. Но для каждого отдельного стрелка она остаётся неизменной, так что опытный тренер по одному виду мишени может установить, кому из его учеников она принадлежит.

Даже на этом простом примере видно, что «законы случая» — не пустая игра слов. Конечно, каждая из пуль попадает в случайную точку мишени, которую нельзя предсказать заранее. Однако при большом числе выстрелов попадания образуют настолько закономерную картину, что мы воспринимаем её как достоверную и совершенно забываем о вероятности, лежащей в её основе.

Дифракция электронов

Простой пример со стрельбой напоминает опыты квантовой механики значительно больше, чем это может показаться на первый взгляд. Чтобы убедиться в этом, заменим ружьё «электронной пушкой», мишень — фотопластинкой, а между ними поместим тонкую металлическую фольгу.



«Электронная пушка» — не шутка, а научный термин, который обозначает устройство для получения пучка электронов, примерно такое же, как в телевизионной трубке. Из этого пучка с помощью диафрагм мы можем выделить очень узкий луч, в котором все электроны движутся с одинаковой скоростью. Направим теперь его через металлическую фольгу на фотопластинку и затем проявим её. Какое изображение мы увидим? Точку? Эллипс рассеяния, как при стрельбе в тире? Или что-нибудь ещё? Ответ известен ещё со времен опыта Дж. П. Томсона: на фотопластинке мы увидим дифракционные кольца. Теперь можно понять и причину их появления.

В самом деле, электрон — не только частица, но также и волна. И если до сих

пор мы ещё не привыкли к этому факту, то, во всяком случае, должны были его запомнить. Поэтому сама по себе дифракция электронов не должна нас особенно удивлять: явление дифракции возникает всегда, если через вещество проходит волна, длина которой сравнима с расстоянием между атомами. Вопрос в другом. Волна *чего* проходит вместе с электроном через фольгу?

По морю гуляют морские волны — они состоят из воды. Космос пронизывают электромагнитные волны — они представляют собой колебания электрического и магнитного полей. Но из чего состоит волна электрона, если сам он неделим и не имеет внутренней структуры?

Прежде чем ответить на этот вопрос, поставим мысленно опыт с пучком электронов немного по-другому. Станем выпускать электроны по одному (как пули из винтовки) и каждый раз менять фотопластинку за фольгой. После проявления всех фотопластинок на каждой из них обнаружится точка — след от упавшего электрона. (Уже один этот факт, если бы не было других доказательств, мог бы убедить нас в том, что электрон — это всё-таки частица.) На первый взгляд, чёрные точки на пластинках расположены совершенно беспорядочно, и, конечно, ни одна из них ничем не напоминает дифракционную картину. Но если мы сложим все пластинки в одну стопку и посмотрим её на просвет, то с удивлением обнаружим всё те же дифракционные кольца. Стало быть, чёрные следы от электронов разбросаны на пластинках не так уж беспорядочно, как это может показаться вначале.

Идея этого опыта проста настолько, что может даже обидеть некоторых читателей своей тривиальностью. Не случайно, что он был поставлен лишь в 1949 г.: до такой степени физики не сомневались

в его исходе, хотя и признавали его желательность и убедительность. (Этот опыт, технически довольно сложный, поставил советский учёный Валентин Александрович Фабрикант.)

Конечно, вовсе не обязательно для каждого электрона брать отдельную пластинку, вполне достаточно одной пластинки-мишени, только по-прежнему надо пускать электроны-пули поодиночке. Как и прежде, мы не можем заранее предсказать, в какую точку пластинки попадёт каждый следующий электрон. Это *случайное событие*. Однако если мы выпустим достаточно много электронов, то получим закономерную дифракционную картину.

С такими явлениями мы уже сталкивались при игре «орёл-решка», при бросании кости, при стрельбе в тире. Эта аналогия приводит к естественному предположению: процесс рассеяния электронов подчиняется законам теории вероятностей. При дальнейшем размышлении и после знакомства с идеями Макса Борна эта догадка сменяется уверенностью.

Волны вероятности

Макс Борн (1882—1970) преподавал физику в признанном центре немецкой науки — Гёттингене. Он пристально следил за развитием теории атома и был одним из первых, кто придал квантовым идеям Гейзенберга строгую математическую форму. В середине 1926 г. он заинтересовался опытами по дифракции электронов. Само по себе это явление после работы де Бройля уже не казалось ему удивительным: взглянув на дифракционную картину, он мог теперь объяснить её появление с помощью гипотезы о «волнах материи» и даже вычислить их длину. Однако по-прежнему не удавалось объяснить, что следует понимать под словами «волны

материи». Пульсацию электрона-шарика? Колебания какого-то эфира? Или вибрацию чего-либо ещё более гипотетического? То есть насколько материальны сами «волны материи»?

Летом 1926 г. Макс Борн пришёл к заключению: «*волны материи*» — это «*волны вероятности*» и они характеризуют движение отдельного электрона, в частности вероятность его попадания в определённую точку фотопластинки. (За два года до этого близкое понятие ввели в физику Бор, Крамерс и Слэтер при попытке (неудачной) объяснить опыт Комптона.)

Всякая новая и глубокая идея не имеет логических оснований, хотя нестрогие аналогии, которые к ней привели, можно проследить почти всегда. Поэтому, вместо того чтобы логически доказывать правоту Борна (это невозможно), попытаемся почувствовать естественность его гипотезы. Обратимся снова к игре «орёл–решка» и вспомним причины, которые вынудили нас тогда применить теорию вероятностей. Их три:

- независимость каждого последующего бросания монеты;
- полная неразличимость отдельных бросков;
- случайность исхода любого отдельного бросания, которая проистекает, в частности, от полного незнания начальных условий каждого опыта, то есть от неопределённости начальных координаты и импульса монеты.

Все три условия выполняются в атомных явлениях и, в частности, в опытах по рассеянию электронов. В самом деле:

- каждый электрон как частица рассеивается независимо от других;
- электроны так бедны свойствами (заряд, масса, спин — и это всё), что в квантовой механике они неразличимы, а вместе с тем неразличимы и отдельные акты рассеяния; и, наконец, главное:

- точные значения координат и импульсов электронов нельзя задать в принципе, поскольку это запрещено соотношением неопределённостей Гейзенберга.

В таких условиях бессмысленно искать траекторию каждого электрона. Вместо этого мы должны научиться вычислять вероятность $\rho(x)$ попадания электронов в определённое место x фотопластинки (или, как принято говорить в физике, вычислить функцию распределения $\rho(x)$).

В игре «орёл–решка» это очень просто: даже без вычислений ясно, что вероятность выпадения «орла» равна $1/2$. В квантовой механике дело немного осложняется. Чтобы вычислить функцию $\rho(x)$, описывающую распределение следов от электронов на фотопластинке, необходимо решить уравнение Шрёдингера для волновой функции $\psi(x)$.

Макс Борн утверждал: плотность вероятности $\rho(x)$ найти электрон в точке x равна квадрату волновой функции $\psi(x)$:

$$\rho(x) = |\psi(x)|^2,$$

а вероятность найти его в интервале значений Δx равна $\rho(x) \cdot \Delta x$.

График функции $\rho(x)$ выглядит сложнее, чем диаграмма эллипса рассеяния при стрельбе в тире. Но если вид эллипса нам предсказать не под силу, то функцию $\rho(x)$ мы можем вычислить заранее. Её вид однозначно определяется законами квантовой механики; несмотря на свою необычность, они всё-таки существуют, чего нельзя сказать с уверенностью о законах поведения человека, от которого зависит эллипс рассеяния.

Электронные волны

Когда мы стоим на берегу моря, то у нас не возникает сомнений, что на берег набегают волны, а не что-либо иное. И нас

не удивляет тот достоверный факт, что все они состоят из огромного числа частиц-молекул.

Волны вероятности — такая же реальность, как и морские волны. И нас не должно смущать то обстоятельство, что они построены из большого числа отдельных независимых и случайных *событий*. Морской воде присущи и свойства волн, и свойства частиц одновременно. Это нам кажется естественным. И если мы удивлены, обнаружив такие же свойства у вероятности, то наше недоумение по крайней мере нелогично.

Когда дует ветер, то в море из беспорядочного скопления отдельных молекул возникают правильные ряды волн. Точно так же, когда мы рассеиваем пучок электронов, то отдельные случайные события — следы электронов — закономерно группируются в единую волну вероятности, описывающую распределение этих следов.

Чтобы убедиться в реальности морских волн, необязательно попадать в кораблекрушение, — достаточно взглянуть на море. Чтобы обнаружить волны вероятности, нужны специальные приборы и тщательные опыты. Конечно, эти опыты сложнее, чем простой взгляд с прибрежного утёса к горизонту, но ведь нельзя же только на этом основании отрицать само существование вероятностных волн. В таком случае впору усомниться в существовании вирусов, генов, атомов, электронов — короче, всех объектов, недоступных непосредственному восприятию.

Полистав толстые учебники гидродинамики, можно убедиться, что пути молекул, из которых состоит морская волна, ничем не напоминают волновых движений: они движутся по кругам и эллипсам вверх и вниз и вовсе не участвуют в поступательном движении волны. Они составляют волну, но не следуют за её движени-

ем. Форму этой волны определяют законы гидродинамики.

Точно так же движение отдельных электронов в атоме вовсе не похоже на те колебания, которым мы уподобили их раньше. Но в целом ненаблюдаемые пути электронов принадлежат единому наблюдаемому ансамблю — волне вероятности. Форму этой волны диктуют законы квантовой механики.

Аналогии такого рода можно продолжать и дальше, но сейчас важнее понять другое: как теперь надо понимать слова «электрон — это волна»? Ведь если это не материальная волна, а волна вероятности, то её даже нельзя обнаружить, проводя опыт с отдельным электроном.

Иногда волновой характер квантово-механических явлений трактуют как результат особого рода взаимодействия большого числа частиц. Это объяснение мотивируют как раз тем, что волновые и статистические закономерности атомных явлений вообще нельзя обнаружить, если проводить опыты с отдельно взятой атомной частицей. Ошибка таких рассуждений объясняется элементарным непониманием природы вероятностных законов: *вычислить* волновую функцию $\psi(x)$ и распределение вероятностей $\rho(x)$ можно для *отдельной* частицы. Но *измерить* распределение $\rho(x)$ можно только при *многократном* повторении однотипных испытаний с одинаковыми частицами. (Сам Борн говорил об этом так: «Движение частиц следует законам вероятности, сама же вероятность распространяется в согласии с законами причинности».)

Амплитуда вероятности и суперпозиция состояний

Вероятность состояния квантовой системы — одно из важнейших понятий квантовой механики, но ещё важнее понятие

амплитуда вероятности, частным случаем которой является волновая функция системы. В общем случае решение уравнения Шрёдингера — это комплексная функция $\psi(x) = |\psi(x)| \cdot e^{i\varphi(x)}$. Для вычисления плотности вероятности $\rho(x) = |\psi(x)|^2$ достаточно знать её амплитуду $|\psi(x)|$, но для объяснения явлений интерференции необходимо знать также её фазу $\varphi(x)$, а кроме того, использовать *принцип суперпозиции состояний*. Это новое и специфическое свойство квантовых систем можно пояснить на примере отражения света от полупрозрачной пластинки.

Обычно коэффициент отражения частиц (или квантов света) определяют как отношение числа отражённых частиц к общему числу падающих. А как быть, если кванты света падают на пластинку поодиночке? В этом случае, так же как в эксперименте с бросанием монеты, позволительно говорить только о вероятности отражения и прохождения кванта через пластинку, и квантовая механика даёт метод вычисления этой вероятности. Каждому отдельному фотону ставятся в соответствие волновые функции ψ_1 и ψ_2 , представляющие состояния отражённого и прошедшего фотона соответственно, а вероятности отражения (R) и прохождения (D) равны $R=|\psi_1|^2$ и $D=|\psi_2|^2$ соответственно, причём $R+D=1$.

При прохождении света (или пучка электронов) через две близко расположенные щели (на расстоянии, сравнимом с длиной волны частиц) необходимо учесть также комплексный характер волновой функции. Пройдя обе щели, волновая функция частицы приобретает вид суммы двух амплитуд вероятности:

$$\psi(x) = |\psi_1| e^{i\varphi_1} + |\psi_2| e^{i\varphi_2},$$

а плотность вероятности обнаружить её в точке x экрана равна *квадрату суммы амплитуд*:

$$|\psi|^2 = |\psi_1 + \psi_2|^2 \neq |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2,$$

а не *сумме их квадратов*, как при бросании монеты, поскольку принцип суперпозиции в квантовой механике относится не к вероятностям, а к амплитудам вероятности. Поэтому в выражении

$$|\psi|^2 = \psi^*(x)\psi(x) = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + (\psi_1^* \psi_2 + \psi_1 \psi_2^*),$$

кроме суммы вероятностей $|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$ независимых сигналов от двух щелей, присутствует добавка, представляющая интерференцию двух волн вероятности:

$$(\psi_1^* \psi_2 + \psi_1 \psi_2^*) = |\psi_1| |\psi_2| (e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)}) = 2 |\psi_1| |\psi_2| \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Для одной частицы обе амплитуды равны: $|\psi_1| = |\psi_2|$, т.е. вероятность $|\psi|^2$ попадания частицы в точку x экрана,

$$|\psi|^2 = 4 |\psi_1|^2 \cdot \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2},$$

зависит от разности фаз $\Delta\varphi = \varphi_1(x) - \varphi_2(x)$ волновых функций $\psi_1(x)$ и $\psi_2(x)$, которая меняется от 0 до π , а вероятность $|\psi(x)|^2$ — от 0 до $4|\psi_1|^2$. На экране поэтому вместо изображения двух щелей мы увидим серию интерференционных полос. В частности, может оказаться, что на месте изображения одиночной щели мы не увидим никакого сигнала, что с корпускулярной точки зрения выглядит совершенной бессмыслицей. Наоборот, волновая картина этого явления объясняет это совершенно естественно.

В оптике принцип суперпозиции волн хорошо известен: именно он объясняет явления интерференции при отражении и рассеянии света: кольца Ньютона, эффекты просветлённой оптики, принцип работы эталона Фабри—Перо и т.д. Особенность его использования в квантовой механике состоит в том, что квантовые объекты могут находиться одновременно во всех возможных для системы состояниях, например в состоянии прошедшего и отражённого фотонов или в альтерна-

тивных (с корпускулярной точки зрения) состояниях, описывающих прохождение частицы через каждую из двух (или более) щелей. Такое совмещение классически несовместимых событий становится логически непротиворечивым только после введения понятия амплитуды вероятности, которая описывает не само явление, а вероятность его реализации.

Принцип суперпозиции и концепция вероятности позволили осуществить логически непротиворечивый синтез понятий «волна» и «частица»: каждое из квантовых событий и его регистрация дискретны, но их распределение диктуется законом распространения непрерывных волн вероятности. Их суперпозиция приводит, в частности, и к явлениям интерференции.

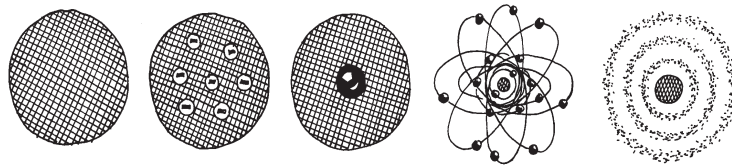
Атом и вероятность

Все предыдущие примеры и рассуждения помогают нам понять, что представляет собой электрон вне атома и почему эта частица наделена также свойствами волны. Как же эти свойства — волны и частицы — можно совместить без логических противоречий *внутри атома*?

До сих пор мы нигде не пытались определить форму атома непосредственно на опыте. Мы её вычислили из волнового уравнения Шрёдингера и поверили в неё, поскольку то же самое уравнение позволяет правильно предсказать самые тонкие особенности наблюдаемых спектров атома. Сейчас эта форма атомов общепризнана, и немного ранее мы привели несколько силуэтов, дающих представление о ней. Глядя на них, трудно отрешиться от мысли, что электрон в атоме представляет собой некое заряженное облако, форма которого зависит от степени возбуждения атома. По многим причинам, однако, эта картина неудовлетворительна.

Прежде всего, электрон — всё-таки частица, и в этом нетрудно убедиться, наблюдая его след в камере Вильсона. А если вспомнить и явление фотоэффекта, то, право, трудно удержаться от категорических утверждений о его истинной природе. Сейчас мы ударились в другую крайность и утверждаем, что электрон в атоме — это заряженное облако. Такое представление наиболее удобно, когда мы пытаемся понять факт устойчивости атома, однако оно совершенно бесполезно для объяснения фотоэффекта. Действительно, никто никогда не видел, чтобы из атома вылетал кусок электронного облака — всегда вылетает целый электрон. Как же происходит мгновенное собирание электронных облаков разной формы всегда в одну и ту же неделимую частицу? Понятие о волнах вероятности позволяет объяснить и этот парадокс.

Поставим мысленный опыт по определению формы атома водорода. Возьмём, как и прежде, «электронную пушку», но теперь будем обстреливать из неё не фольгу, а отдельно взятый атом водорода. Что мы при этом должны увидеть? Большинство электронов «прошлёт» атом водорода, как снаряд рыхлое облако, не свернув с пути. Но, наконец, один из них, столкнувшись с электроном атома, вырвет его оттуда и при этом сам изменит направление своего движения. Теперь позади атома мы увидим не один, а два электрона: один — из «пушки», другой — из атома. Допустим, что мы так точно измерили их пути, что можем восстановить точку их встречи в атоме. Можем ли мы на этом основании утверждать, что электрон в атоме водорода находился именно в этой точке? Нет, не можем. Мы не в состоянии даже проверить своего допущения, поскольку атома водорода больше не существует: наше измерение его разрушило.



Этой беде, однако, легко помочь: все атомы водорода неразличимы, и, чтобы повторить опыт, можно взять любой из них. Повторный опыт нас разочарует: мы обнаружим электрон в атоме водорода совсем не там, где ожидали его найти. Третье, пятое, десятое измерение только укрепит нашу уверенность в том, что электрон в атоме не имеет определённого положения: каждый раз мы будем находить его в новом месте. Но если мы возьмём очень много атомов, проведём очень много измерений и при этом всякий раз будем отмечать точкой место электрона в атоме, найденное в каждом отдельном опыте, то в конце опытов мы с удивлением обнаружим, что точки эти расположены не беспорядочно, а группируются в уже знакомые нам силуэты, объёмные прообразы которых мы вычислили ранее из уравнения Шрёдингера.

Этот факт нам уже знаком из опытов по дифракции электронов. В самом деле, тогда мы не знали, в какое место фотопластинки попадёт электрон, теперь мы не знаем, в каком месте атома мы его найдём. Как и прежде, сейчас мы можем указать только вероятность обнаружения электрона в каком-то определённом месте атома. В одной точке атома эта вероятность больше, в другой — меньше, но в целом распределение вероятностей образует закономерный силуэт, который мы и принимаем за форму атома.

Ничего другого нам не остаётся. Можно, конечно, возразить, что это не отдельный атом, а некий обобщённый образ

многих атомов. Но это слабый аргумент: ведь все атомы в одном и том же квантовом состоянии неразличимы между собой. Поэтому точечные картинки, полученные в опыте по рассеянию электронов на *многих*, но *одинаковых* атомах, определяют одновременно и форму *одного*, отдельно взятого атома.

Здесь, как и везде, где справедливы законы случая, необходимо учитывать их особенности. Для каждого отдельного атома функция $\rho(x)$ указывает лишь распределение вероятностей найти электрон в точке x атома. Именно в этом смысле можно говорить о «вероятностной форме отдельного атома». Но картина эта достоверна, поскольку она совершенно однозначна для любой совокупности одинаковых атомов.

Надо признать, что психологически нам легче мыслить электрон частицей. Поэтому заключение о вероятностной природе его волновых свойств мы воспринимаем с некоторым облегчением: оно не вызывает у нас такого инстинктивного протеста, как прямолинейное утверждение «электрон — это волна».

Сейчас мы достигли предела, доступного всем, кто пытается проникнуть в глубь атома без формул и уравнений. Новый образ атома верен теперь во всех деталях. Не пользуясь «математической кухней» квантовой механики, нельзя предсказать ни одного атомного явления, однако объяснить кое-что теперь можно, если использовать новый образ грамотно и помнить о его происхождении.

Как это ни странно, но создатель античной атомистики Демокрит нацело отрицал роль случайности в явлениях природы. Более того, он исповедовал ту крайнюю форму детерминизма, которую впоследствии свяжут с именем Лапласа. Только Эпикур смягчил крайности его учения, оставляя за атомами свойство и способность (он назвал их «отклонением») варьировать свой путь даже под действием одинаковых сил. (При желании в этом постулате можно усмотреть предвосхищение соотношения неопределённостей и вероятностей трактовки квантовой механики.)

Наша теперешняя картина атома бесконечно далека от представлений Демокрита. В сущности, от них сохранилась лишь исходная идея. Но плодотворные заблуждения всегда лучше, чем бесплодная непогрешимость: не будь их, Колумб никогда бы не открыл Америку.

Вероятность и спектры атомов

Не только форма атома, но и все процессы в нём подчиняются законам теории вероятностей. Имея дело с отдельным атомом, никогда нельзя сказать наверняка, где находится его электрон, куда он попадёт в следующий момент и что произойдёт при этом с самим атомом. Однако уравнения квантовой механики всегда позволяют вычислить вероятности всех этих процессов. Вероятностные предсказания можно затем проверить и убедиться, что они достоверны, если провести достаточно много одинаковых испытаний. Даже такие люди, как Резерфорд, далеко не сразу поняли эту особенность квантовых процессов.

Он был первым читателем тогда ещё рукописной статьи Бора о строении атома. Возвращая рукопись, Резерфорд с присущей ему прямоотой и резкостью спросил Бора: «А откуда электрон, сидящий на n -й орбите, знает, куда ему надо прыгнуть: на

k -ю или на i -ю орбиту?» Тогда, в 1913 г., у Бора не было убедительного ответа. Теперь можно было бы ответить так: электрон ничего не знает заранее — он следует квантовым законам. Согласно этим законам всегда существует строго определённая вероятность перехода электрона из состояния с номером n в любое другое состояние (например, в состояние k). Как всегда, вероятность W_{nk} такого перехода — это число, значение которого зависит от выбора пары квантовых состояний n и k . Перебирая всевозможные комбинации номеров n и k , получим квадратную таблицу чисел W_{nk} , которая представляет внутреннее состояние атома и, как мы теперь знаем, называется матрицей. С её помощью можно, например, объяснить, почему в жёлтом дублете D -линии натрия линия D_2 в два раза интенсивнее, чем линия D_1 . Последовательно используя уравнения квантовой механики, можно понять также и более тонкие особенности строения этих линий, например законы изменения интенсивности внутри них самих. Понятно, однако, что все эти радости доступны только профессионалам.

Причинность и случайность, вероятность и достоверность

Вероятностная интерпретация квантовой механики очень многим пришлась не по душе и вызвала многочисленные попытки возврата к прежней, классической схеме описания. Это стремление во что бы то ни стало использовать старые знания в новых условиях по-человечески понятно, но ничем не оправдано. Оно напоминает желание отставного солдата осмыслить всё многообразие жизни с позиций строевого устава. Безусловно, его возмутит беспорядок на дискотеке, и довольно трудно будет объяснить ему, что там действуют несколько иные законы, чем на армейском плацу.

В СССР полвека назад недобросовестные интерпретаторы квантовой механики с подозрительным рвением пытались отменить её только на том основании, что она не укладывалась в рамки ими же придуманных схем. Они возмущались «свободой воли», которая якобы дарована электрону, шельмовали соотношение неопределённостей и всерьёз доказывали, что квантовая механика — бесполезная наука, коль скоро она толкует не о реальных событиях, а об их вероятностях. Те, кто внимательно проследил предыдущие рассуждения, понимают всю вздорность подобных обвинений. Но даже те, кто относится уважительно к теории атома, не всегда чётко сознают, как понимать причинность атомных явлений, если каждое из них случайно, и насколько достоверны её предсказания, если все они основаны на понятии вероятности.

Житейское понятие причинности — «всякое явление имеет свою причину» — не требует объяснений, но для науки бесполезно. Причинность в науке требует *закона*, с помощью которого можно проследить последовательность событий во времени. На языке формул этот закон принимает вид дифференциального уравнения, которое называют уравнением движения. В классической механике такие уравнения — уравнения движения Ньютона — позволяют предсказать траекторию движения частицы, если точно задать её начальную скорость и координату. Именно такая бегло очерченная схема объяснения и предсказания явлений природы всегда составляла идеал причинного описания в классической физике. Она не оставляет места для сомнений и кривотолков, и чтобы подчеркнуть это её качество, причинность классической физики со времён Лапласа называют *детерминизмом*. (Корни этой традиции восходят к Демокриту: «Ни одна вещь не возникает попусту, но всё

происходит в силу необходимости», — говорил он.)

Такой причинности в квантовой физике нет. Но там есть своя, квантовомеханическая причинность и свой закон — уравнение Шрёдингера. В каком-то смысле закон этот даже более могуществен, чем законы Ньютона, поскольку он улавливает и выделяет закономерности даже в хаосе случайных квантовых событий, — подобно калейдоскопу, который в случайном сочетании стёклышек позволяет разглядеть фигуры, имеющие смысл и красоту.

Сочетания слов: «статистическая причинность», «вероятностная закономерность» — с непривычки режут слух своей несовместимостью. («Масляное масло» — плохо, но всё же разумно, однако «немасляное масло» — это уж слишком.) Они и в самом деле несовместимы. Но в квантовой физике мы вынуждены использовать их одновременно при объяснении особенностей квантовых явлений. В действительности никакого логического парадокса здесь нет: понятия «случайность» и «закономерность» — дополнительные понятия. В согласии с принципом дополнительности Бора оба они одновременно и равно необходимы, чтобы определить новое понятие «квантовомеханическая причинность», которая есть нечто большее, чем простая сумма понятий «закономерность» и «случайность». Точно так же, как «квантовый объект» — всегда нечто более сложное, чем бесхитростная сумма свойств «волны» и «частицы».

Случайность единичных квантовых событий — не результат действия неизвестных причин, а первичный элементарный закон, которому они подчиняются, это отправная точка теории, а не факт, подлежащий объяснению. Вероятность — это свойство и категория, присущие самой квантовой реальности, а не удобный математический приём, используемый для описания результатов эксперимента.

При всей логической красоте таких построений привыкнуть к ним и признать их естественными всё-таки довольно трудно. Как всегда в квантовой физике, эти логические трудности объясняются особенностями нашего языка и нашего воспитания. Понятия «закономерность» и «случайность», «достоверность» и «вероятность» возникли задолго до квантовой механики, и смысл, который в них обычно вкладывают, не зависит от желания квантовых физиков. (К слову: сочетание слов «закономерная случайность» не резало слух мудрецов античной Греции.)

Проблема вероятности — это проблема наблюдения: что произойдёт, если мы делаем нечто. В классической физике два одинаковых испытания при одинаковых начальных условиях всегда должны приводить к одному и тому же конечному результату. В этом суть классической причинности, или детерминизма. Своеобразие квантово-механической причинности состоит в том, что даже при неизменных условиях она может указать лишь вероятность исхода отдельного испытания, но зато совершенно достоверно предсказывает распределение исходов при большом числе тех же самых испытаний. С квантовой точки зрения традиционная формулировка закона причинности — «зная точно настоящее, можно уверенно предсказать будущее» — содержит неверную предпосылку: в силу соотношения неопределённостей мы *в принципе* не можем знать настоящее во всех деталях. Заключение же остаётся верным, если понимать его теперь по-новому.

Можно без конца жонглировать парадоксами «закономерная случайность», «достоверная вероятность», однако это ничего не прибавит к нашим знаниям об атоме. Суть не в этом. Просто нужно понять хотя бы однажды, что вероятностное описание атома — это не результат усреднения пока ещё неизвестных свойств субатомных

явлений, а принципиальный предел возможностей квантовой науки: пока остаётся в силе соотношение неопределённостей, мы не можем беспрестанно уточнять наши сведения об индивидуальных квантовых объектах. По существу, нам это и не нужно: все тела в природе состоят из огромного числа атомов, а свойства таких систем квантовая механика предсказывает однозначно и без всякого произвола.

Понятие о вероятности завершило логическую схему квантовой механики. Только с его помощью удалось логически непротиворечиво осуществить высший синтез дополнительных пар понятий: волна — частица, непрерывность — дискретность, причинность — случайность, явление — наблюдение. Лишь после этого удалось, наконец, уяснить, что все эти понятия образуют единую неделимую *систему* и смысл каждого из них зависит от контекста других. Точно так же, как нельзя объяснить, кто такой Геракл, не упоминая при этом Зевса, Атланта, Медузу Горгону, кентавра Хирона: только все вместе они образуют неповторимую ткань единого древнего мифа.

Изучая природу, мы всегда — сознательно или бессознательно — расчленяем её на две части: на объект и наблюдателя. Разделение это неоднозначно и зависит от того, *какое* явление мы изучаем и *что* мы хотим о нём узнать. Если под явлением мы понимаем движение отдельной *частицы*, то это событие *дискретно, случайно* и большей частью ненаблюдаемо. Но если явлением мы называем результат *наблюдения* за движением многочисленных одинаковых квантовых объектов, то это событие *непрерывно, закономерно* и описывается волновой функцией.

Квантовая механика изучает только такие явления и объекты. Для них она даёт достоверные и однозначные предсказания, которые до сих пор ни разу не были опровергнуты опытом.

Вокруг кванта

Люди, события, кванты



Результаты науки не зависят от психологии или желаний отдельных людей и в этой объективности её сила и ценность. Но наука — дело человеческое, и оттого её история — это не только открытие явлений, формулировка понятий и создание методов, но также история человеческих судеб. Рядом с их открытиями любая подробность жизни учёных выглядит значительной: мы всегда стремимся понять, как та или иная мелочь, из которых складывается повседневная жизнь и великих людей, повлияла на дела, их обессмертившие.

История создания квантовой механики сохранила несколько живых воспоминаний, которые помогают представить ту обстановку напряжения и подъёма, в которой люди разных национальностей, возрастов и темпераментов всего за три года построили современное здание квантовой механики.

Быть может, всё началось в тот день, когда Зоммерфельд вошёл в комнату, где занимался второкурсник Гейзенберг, запретил ему играть в шахматы, дал в руки фотопластинку с фотографией спектра излучения атома в магнитном поле и предложил найти закономерности в расположении спектральных линий. А может — тремя годами позже, в июне 1922 г., во время длительной прогулки Гейзенберга и Бора, который по приглашению Гёттинггенского университета читал там цикл лекций по квантовой теории. Или, наконец, в начале июня 1925 г., когда ассистент Вернер Гейзенберг заболел сенной лихорадкой и по совету своего тогдашнего руководителя Макса Борна уехал отдыхать на остров Гельголанд в Северном море. Там он проделал свои знаменитые вычисления и пережил редкий душевный подъём, о чём впоследствии рассказывал так: «Наконец настал вечер, когда я смог приступить к вычислению энергии отдельных членов в энергетической таблице или, как говорят сегодня, в матрице энергии. Возбуждение, охватившее меня,... мешало сосредоточиться, и я начал делать в вычислениях ошибку за ошибкой. Окончательный результат удалось получить лишь к трём ночи. В первый момент я испугался... При мысли, что я стал обладателем всех этих сокровищ — изящных математических структур, которые природа открыла передо мной, — у меня захватило дух. О том, чтобы заснуть, нечего было и думать. Начало уже светать. Я вышел из дому и отправился к южной оконечности острова, где в море вы-



Макс Борн



Дирак

Физическая теория должна быть математически красивой.

Поль Дирак

давалась одиноко стоящая скала... Без особого труда одолев высоту, я дождался восхода Солнца на её вершине».

Уже 24 июня, по возвращении из отпуска, он написал о своих вычислениях подробное письмо Паули, а набросок статьи отдал Макс Борну с просьбой поступить с ней по его усмотрению. Борн одобрил его идею, и 29 июля статья Гейзенберга «О квантовомеханическом истолковании кинематических и механических соотношений» поступила в редакцию журнала. Сам Гейзенберг, по-видимому, не сразу осознал значение своей работы, поскольку, выступая 28 июля по приглашению «клуба Капицы» в Кембридже, он избрал для доклада другую тему: «О терм-зоологии и Земан-ботанике».

Макс Борн продолжал упорно думать о смысле работы своего ассистента. «Гейзенберговское правило умножения, — вспоминал он в своей Нобелевской речи, — не давало мне покоя, и через восемь дней интенсивных размышлений и проверок в моей памяти воскресла алгебраическая теория, которой учил меня профессор Розанес в Бреслау... Я никогда не забуду того глубокого волнения, которое я пережил, когда мне удалось сконцентрировать идеи Гейзенберга о квантовых условиях в виде таинственного уравнения $pq - qp = h/2\pi i$ ».

Как раз в это время Борн по пути в Ганновер поделился в поезде с коллегой из Гёттингена трудностями нового исчисления. По воле случая или прихоти судьбы в том же купе ехал недавний студент Паскуаль Йордан — один из немногих людей, знавших в то время матричное исчисление, поскольку именно он помогал Рихарду Куранту готовить к печати вышедший в 1924 г. знаменитый курс «Методы математической физики» Куранта и Гильберта. На вокзале в Ганновере Йордан представился Борну и предложил свою помощь. Это было как нельзя более кстати, поскольку Паули сотрудничать с Борном отказался и советовал ему вообще не вмешиваться в развитие событий, искренне считая, что новая наука — это «*Knabenphysik*» — «физика для мальчиков» (Борну в то время было 42 года, — слишком много, по мнению Паули). Борн и Йордан завершили свою статью к осени, вскоре к ним присоединился Гейзенберг, и совместно они дали первое последовательное изложение матричной механики (16 ноября 1925 г. их статья «О квантовой механике» поступила в редакцию журнала).

Чуть раньше, 7 ноября того же года, в редакцию поступила статья Дирака «Основные уравнения квантовой механики», в которой он предложил своё математическое

Единственная загадка мира — его познаваемость.

Альберт Эйнштейн

оформление идей Гейзенберга. По образованию Дирак был инженером-электриком, но в годы послевоенной депрессии он не нашёл работы по специальности и решил продолжить образование в Кембридже под руководством Фаулера, от которого он и узнал о статье Гейзенберга, после того как в сентябре 1925 г. Фаулер получил её гранки от Борна.

Той же осенью Борн уехал в длительную командировку в Америку и во время пребывания там зимой 1926 г. совместно с Норбертом Винером (будущим создателем кибернетики) ввёл одно из самых важных понятий квантовой механики — понятие *оператора физической величины*, который, в частности, может быть представлен и матрицей, как в схеме Гейзенберга. А вскоре Вольфганг Паули с помощью матричной механики нашёл энергии уровней атома водорода и показал, что они совпадают с энергиями стационарных состояний атома Бора.

Годом раньше, 29 ноября 1924 г., Луи де Бройль защитил диссертацию «Исследования по теории квантов». В 1910 г. он получил в Сорбонне звание лиценциата литературы по разделу истории, однако под влиянием брата Мориса, лекций Ланжевена по теории относительности и чтения книг Пуанкаре «Наука и гипотеза», «Ценность науки» он со всем пылом юности отдался изучению физики.

Морис де Бройль был признанным специалистом в физике рентгеновских лучей и много думал над их природой. В 1963 г. Луи де Бройль вспоминал: «Мой брат считал рентгеновские лучи некой комбинацией волны и частицы, но, не будучи теоретиком, не имел особенно чётких представлений об этом предмете... Он настойчиво обращал мое внимание на важность и несомненную реальность дуальных аспектов волны и частицы. Эти долгие беседы... помогли мне глубоко понять необходимость обязательной связи волновой и корпускулярной точек зрения».

Уже в своей первой статье 1923 г. Луи де Бройль высказал предположение, что «пучок электронов, проходящий через достаточно узкое отверстие, также должен обнаруживать способность к интерференции». Тогда на это замечание никто из серьёзных экспериментаторов внимания не обратил, хотя уже в то время был известен эксперимент Дэвиссона и Кансмана, а также опыты Карла Рамзауэра (1879—1955) и Джона Таунсенда (1868—1957), из которых следовало, что электроны, проходя через газы при определённых энергиях, почти не рассеиваются — явление, аналогичное эффектам просветлённой оптики и противоположное резонансному поглощению, наблюдаемому в опыте Франка и Герца.

Там, где раньше были границы науки, там теперь её центр.

Георг Лихтенберг

То, что кажется странным, редко остаётся необъяснённым.

Георг Лихтенберг

Поль Ланжевен, руководитель диссертации де Бройля, относился к его идеям сдержанно, но доброжелательно. В апреле 1924 г. он сообщил их участникам IV Сольвеевского конгресса, а в декабре послал диссертацию на отзыв Эйнштейну, который, в свою очередь, горячо советовал Макс Бору: «Прочтите её! Хотя и кажется, что её писал сумасшедший, написана она солидно». В дальнейшем Эйнштейн сочувственно цитировал её в своих работах, а Шрёдингер благодарил его за то, что он его вовремя «щёлкнул по носу, указав на важность идей де Бройля».

Не все приняли идею о волнах материи столь же благосклонно. Планк вспоминал впоследствии, что, услышав от Крамерса на одном из семинаров о работе де Бройля, он «только покачал головой», а присутствовавший при этом Лоренц сказал: «Эти молодые люди считают, что отбрасывать старые понятия в физике чрезвычайно легко!»

В начале 1925 г. Макс Борн обсуждал эти идеи со своим близким другом и коллегой по Гёттингенскому университету Джеймсом Франком. При обсуждении присутствовал студент Борна Вальтер Эльзассер, который тут же предложил провести эксперимент по дифракции электронов. «Это необязательно, — ответил Франк, — эксперименты Дэвиссона уже установили наличие наблюдаемого эффекта» (сам Дэвиссон так не считал и вряд ли хорошо был знаком с идеями де Бройля). Вальтер Эльзассер после этих дискуссий написал короткую заметку, в которой объяснял результаты опытов Дэвиссона и Кансмана, а также эффект Рамзауэра–Таунсенда с помощью представлений о волнах материи.

Заметка Эльзассера была напечатана в июле 1925 г., ещё до направления в печать первой работы Гейзенберга, но на неё мало кто обратил тогда внимание: вскоре большинство увлеклось новой матричной механикой.

Эрвину Шрёдингеру в 1925 г. было уже 38 лет, и он не так просто поддавался моде и увлечениям. Как и Гейзенберг, он окончил классическую гимназию, где основными предметами были латынь и греческий, а по складу ума он был поэт и мыслитель. К сожалению, Шрёдингер не оставил после себя, подобно Гейзенбергу, живых воспоминаний об эпохе «*Sturm und Drang*» квантовой механики. Быть может, потому, что свои главные открытия он сделал в зрелые годы, когда юношеский пыл действия сменяется спокойной мудростью знания, а ликование первооткрывателя смягчается пониманием относительной ценности всего сущего.

О своем тогдашнем впечатлении от теории Гейзенберга–Борна–Йордана Шрёдингер впоследствии вспоминал:

Наука никогда не решает проблемы, не поставив при этом десятка новых.

Бернард Шоу

*Мы постигаем истину
не только разумом, но и
сердцем... У сердца свои
законы, которых разум
не знает.*

Блез Паскаль

«...меня отпугивали, если не сказать отталкивали, казавшиеся мне очень трудными методы трансцендентной алгебры и отсутствие всякой наглядности». Взгляды де Бройля были ему явно ближе, и тут же представился случай изучить их более пристально: в конце 1925 г. Петер Дебай, которого он сменил на кафедре физики в Цюрихском университете, попросил рассказать о работах де Бройля аспирантам знаменитого Цюрихского политехникума. Вскоре после этого появилась первая статья из серии работ Шрёдингера «*Квантование как проблема собственных значений*» (она поступила в редакцию 27 января 1926 г., примерно в то же время, когда Борн и Винер ввели понятие оператора, а Паули с помощью матричной механики нашёл спектр атома водорода). 21 июня 1926 г. Шрёдингер отправил в редакцию шестую статью серии, а уже 25 июня Борн направил в печать сообщение, в котором предлагалась статистическая интерпретация волновой функции. Тем самым построение основ волновой квантовой механики было, по существу, закончено.

Через много лет Макс Борн, говоря об этих работах Шрёдингера, воскликнет: «Что есть более выдающегося в теоретической физике?», а Макс Планк добавит: «Уравнение Шрёдингера в современной физике занимает такое же место, какое в классической механике занимают уравнения, найденные Ньютоном, Лагранжем и Гамильтоном». Но в то время теоретики встретили волновую механику настороженно, поскольку в ней явно отсутствовали «квантовые скачки» — то, к чему лишь недавно и с большим трудом привыкли и что считалось главной особенностью атомных явлений.

В июне 1926 г. Гейзенберг приехал в Мюнхен навестить родителей и «пришёл в совершенное отчаяние», услышав на одном из семинаров доклад Эрвина Шрёдингера и его интерпретацию квантовой механики. «Чем больше я размышляю над физической стороной теории Шрёдингера, тем ужаснее она мне кажется», — писал он Паули.

Зато экспериментаторы (Вильгельм Вин и другие), которые называли теорию Гейзенберга «атомистикой» (то есть мистикой атома), приветствовали теорию Шрёдингера с воодушевлением. (Вин к тому же, без сомнения, не забыл, как Гейзенберг провалил ему выпускной экзамен по экспериментальной физике.)

Споры о волновой механике продолжались часами и днями и достигли предельной остроты в сентябре 1926 г., когда Шрёдингер приехал по приглашению Бора в Копенгаген. Шрёдингер настолько устал от дискуссий, что даже заболел и несколько дней провёл в доме Бора, который в те-

*Несчастливы те люди, ко-
торым всё ясно.*

Луи Пастер

*Вероятностные знания —
вот предел человеческого
разумения.*

Цицерон

чение всей болезни почти не отходил от его постели. Время от времени, характерным жестом подняв палец, Нильс Бор повторял: «Но, Шрёдингер, вы всё-таки должны согласиться...» Однажды, почти в отчаянии, Шрёдингер воскликнул: «Если мы собираемся сохранить эти проклятые "квантовые скачки", то я вообще сожалею, что имел дело с атомной теорией!» — «Зато остальные весьма признательны вам за это», — ответил ему Бор.

С течением времени точки зрения сторонников матричной и волновой механики сближались. Сам Шрёдингер доказал их математическую эквивалентность ещё в марте 1926 г., и независимо от него к тому же выводу пришли Карл Эккарт в Америке, Корнелиус Ланцос и Вольфганг Паули в Германии.

В августе 1926 г. на съезд Британской ассоциации содействия науке приехал из Америки Дэвиссон и обсуждал с Борном, Хартри и Франком свои новые эксперименты по отражению электронов от поверхности кристаллов. Они снабдили Дэвиссона статьями Шрёдингера, которые он прилежно изучал на обратном пути через океан. Год спустя, продолжая с Джермером свои опыты, он экспериментально доказал реальность электронных волн, а за полгода до этого, в мае 1927 г., Дж. П. Томсон также обнаружил дифракцию электронов, — волновая механика обрела прочное экспериментальное основание.

Опыты по дифракции электронов, впервые ставшие известными летом 1926 г., сильно укрепили веру в теории де Бройля и Шрёдингера. Тем же летом Макс Борн закрепил это умонастроение утверждением: *волны материи — это волны вероятности, а мера вероятности — квадрат волновой функции*. Постепенно физики не только поняли, но и смирились с тем, что *дуализм волна—частица* — это твёрдо установленный факт, а не остроумная гипотеза. Теперь учёные старались понять, к каким следствиям он приводит и какие ограничения накладывает на представления о квантовых процессах. При этом они сталкивались с десятками парадоксов, смысл которых понять зачастую не удавалось.

*Нужно носить ещё в себе
хаос, чтобы быть в со-
стоянии родить танцую-
щую звезду.*

Фридрих Ницше

В ту осень 1926 г. Гейзенберг жил в мансарде физического института в Копенгагене. По вечерам к нему наверх поднимался Бор, и начинались дискуссии, которые часто затягивались далеко за полночь. «Иногда они заканчивались полным отчаянием из-за непонятности квантовой теории уже в квартире Бора за стаканом портвейна», — вспоминал Гейзенберг. «Однажды после одной такой дискуссии я, глубоко

Нелегко найти способ объяснения того, что мы предлагаем. Ибо то, что ново в себе, будет понятно только по аналогии со старым.

Фрэнсис Бэкон

Не так легко приходят в голову доводы в защиту истинного, как в оправдание ложного.

Цицерон

обеспокоенный, спустился в расположенный за институтом Фэллед-парк, чтобы прогуляться на свежем воздухе и немного успокоиться перед сном. Во время этой прогулки под усеянным звёздами ночным небом у меня мелькнула мысль, не следует ли постулировать, что природа допускает существование только таких экспериментальных ситуаций, в которых... нельзя одновременно определить место и скорость частицы». В этой мысли — зародыш будущего соотношения неопределённостей.

Быть может, чтобы снять напряжение тех дней, в конце февраля 1927 г. Нильс Бор уехал отдохнуть в Норвегию. Оставшись один, Гейзенберг продолжал напряжённо думать. В частности, его занимал давний вопрос товарища по учебе Борхерта Друде (сына известного физика Пауля Друде): «Почему нельзя наблюдать орбиту электрона в атоме при помощи лучей с очень малой длиной волны, например гамма-лучей?» Обсуждение этого эксперимента довольно быстро привело его к соотношению неопределённостей. (Надо думать, что Гейзенберг с благодарностью вспомнил при этом строгого экзаменатора Вилли Вина, который хотел прогнать его с экзамена за незнание предела разрешающей способности микроскопа. Как впоследствии признавался сам Гейзенберг, он был достаточно добросовестным, чтобы всё-таки изучить этот раздел оптики после экзамена, который ему зачли лишь благодаря заступничеству Зоммерфельда, и знания эти оказались теперь как нельзя более кстати.)

Через несколько дней возвратился из отпуска Бор с готовой идеей дополнительности, которую он окончательно продумал в Норвегии. Ещё через несколько недель напряжённых дискуссий с участием Оскара Клейна все пришли к выводу, что соотношение неопределённостей — это частный случай принципа дополнительности, для которого возможна количественная запись на языке формул. 23 марта 1927 г. статья Гейзенберга «О наглядном содержании квантотеоретической кинематики и механики» с комментарием Бора поступила в редакцию.

К этому времени квантовую механику изучают уже повсеместно, больше всех, конечно, в Гёттингене и Копенгагене. В зимнем семестре 1926—1927 гг. Давид Гильберт дважды в неделю читал в Гёттингенском университете курс по математическим методам квантовой механики (он был издан уже весной 1927 г.). Ему помогал 23-летний выходец из Венгрии Джон (Янош, Йоганн) фон Нейман (будущий создатель вычислительных машин, теории игр, один из величайших математиков XX века), который два года спустя

Сущности не следует умножать без необходимости.

Уильям из Оккама

придаст квантовой теории черты математической строгости и концептуальной независимости.

Со времени появления первой статьи Гейзенберга математический аппарат новой механики непрерывно совершенствовался, а её интерпретация постепенно дополнялась и уточнялась. Через два года, к осени 1927 г., по квантовой механике было опубликовано более двухсот работ, и значительная их часть не устарела до сих пор. 16 сентября 1927 г. в Комо на Международном конгрессе в честь столетнего юбилея Александра Вольты Нильс Бор прочёл доклад «Квантовый постулат и новейшее развитие атомной теории». В нём он впервые последовательно изложил систему понятий квантовой физики и ввёл термин «дополнительность». Несколько недель спустя, в конце октября 1927 г., в Брюсселе на V Сольвеевский конгресс собрались Планк, Эйнштейн, Лоренц, Бор, де Бройль, Борн, Шрёдингер, а из молодых — Гейзенберг, Паули, Дирак, Крамерс. Здесь окончательно утвердилось то представление о квантовой механике и та система понятий, которые впоследствии получили название «копенгагенской интерпретации». Дискуссии на конгрессе стали самой суровой проверкой всех положений квантовой механики. Она её с честью выдержала и с тех пор не претерпела почти никаких изменений в своих основах.

Вспоминая то героическое время четверть века спустя, Роберт Оппенгеймер писал: «Это было время неофициальных сообщений и спешно созываемых конференций, споров, критики и блестящих математических импровизаций... Для всех, участвовавших в этой работе, это было время творческих свершений, и в их прозрениях были и восторг, и ужас. Это время, по-видимому, не будет достаточно полно отражено в истории, потому что для этого потребовалось бы такое же высокое мастерство, как для создания легенды об Эдипе или истории Кромвеля. К тому же эта область знаний так далека от сферы общечеловеческого опыта, что вряд ли знакома поэтам и историкам».

Истина существовала изначально, заблуждение явилось впоследствии.

Тертуллиан

В те годы в Копенгагене в институте Бора создавалась не только наука об атоме — там выросла интернациональная семья молодых физиков. Среди них были Крамерс, Гаудсмит и Розенфельд — из Голландии, Клейн — из Швеции, Дирак — из Англии, Гейзенберг — из Германии, Бриллюэн — из Франции, Паули — из Австрии, Нишина — из Японии, Крониг и Уленбек — из Америки, Гамов и Ландау — из России... Беспрецедентное в истории науки содружество учёных отличали бескомпромиссное стремление к истине, искреннее восхищение величием решаемых ими задач и неистребимое

Всякое человеческое высказывание об истине есть предположение, ибо точное знание истины невозможно.

Николай Кузанский

Все трудности исчезнут, когда люди начнут думать не о том, о чём они должны думать, а о том, как они должны думать.

Георг Лихтенберг

чувство юмора, так гармонизировавшее с общим духом интеллектуального благородства. «Есть вещи настолько серьёзные, что о них можно говорить лишь шутя», — любил повторять Нильс Бор — «Сократ XX века», который стал их учителем и духовным отцом.

В них жила та искра космического чувства, которая отличает людей истинно великих. Это чувство вечности они сохранили даже в гражданских смутах, современниками и участниками которых им довелось стать. Через много лет политические бури разбросают их по всему миру: Гейзенберг станет главой немецкого «уранового проекта», Нишина возглавит японскую урановую программу, сам Нильс Бор, спасаясь от нацистов, окажется в американском центре атомных исследований в Лос-Аламосе, а Гаудсмита назначат руководителем миссии «Алсос», которая должна была выявить, что успел сделать Гейзенберг для постройки немецкой атомной бомбы...

Никого из них уже нет в живых: первым ушёл Эйнштейн — в 1955 г., Паули — в 1958 г., Шрёдингер — в 1961 г., Бор — в 1962 г., Борн — в 1970 г., Гейзенберг — в 1976 г., Дирак — в 1985 г., де Бройль — в 1987 г., и вместе с ними ушла целая эпоха, которую можно сравнить лишь с эпохой Галилея и Ньютона.

Квантовая механика — теоретический базис квантовой физики — была создана всего за три года: с 1924 по 1927 гг., срок ничтожный даже в масштабе человеческой жизни. Она разделила жизнь её создателей на две части: до и после рождения квантовой механики. Интеллектуальный прорыв, совершённый ими, кардинально изменил быт современного человека: телевидение, радиотелефон, компьютер, спутник и многое другое были бы невозможны без их открытия. После них картина мира стала другой, и это самое важное следствие тех вдохновенных лет.



Сирена, Греция

Глава одиннадцатая

**Что такое атом?
Что такое квантовая механика?
Физическая реальность**

Вокруг кванта

**От относительного к абсолютному
В поисках последних понятий**

Формулировка и уточнение понятий — занятие сложное и не всегда безопасное. В свое время Сократ поплатился жизнью за настойчивые попытки уяснить смысл основных морально-этических понятий: добро и зло, истина и заблуждение, справедливость и закон... Сократ жил в античной Греции времен её наивысшего расцвета. Как истинный мудрец, он проводил свои дни на солнечных площадях Афин и испытывал сограждан вопросами такого рода: «Скажи мне, многоучёный Гиппий, что есть прекрасное?» Учёный собеседник с жаром принимался за объяснения, но вскоре убеждался, что не может выйти за круг примеров: он толковал более или менее понятно, что такое прекрасная женщина, прекрасный горшок с кашей или прекрасная лошадь, но объяснить, что есть прекрасное само по себе, ему всякий раз оказывалось не под силу.

Трагизм этой типичной мыслительной ситуации понимали во все времена. Понимали и смирялись: «Истина лежит за пределами сознания и потому не может быть выражена словами», — говорили в Древней Индии. В своём стремлении ответить на вопрос: «Что такое атом?» — мы неизбежно приходим к тем же трудностям. На частных примерах мы постепенно убедились, что атом — это не спектральные линии, им испускаемые, и не многообразие кристаллов, которые из атомов построены, не тепло раскалённого металла и не электроны, вылетающие из атомов.

Подобно собеседникам Сократа, мы теперь вынуждены признать, что атом — это нечто неопределимое само по себе, некая общая причина квантовых явлений, которые все в той или иной степени необходимы для его определения. Наблюдая раскалённое железо и спек-

тральные линии, кристаллы и процесс электролиза, электроны в трубке Крукса и рассеяние частиц, мы так или иначе касались различных граней атома. Можем ли мы теперь осмысленно ответить на два основных вопроса, которые задали в самом начале?

Что такое атом?

Что такое квантовая механика?

Наш рассказ о квантовой механике мы начали с определения: «Квантовая физика — это наука о строении и свойствах квантовых объектов и явлений». Мы его тут же оставили, поскольку бесполезность его очевидна до тех пор, пока не определено само понятие «квантовый объект». Мы обратились к опытам, в которых проявляются свойства атома, и к формулам, с помощью которых можно объяснить и предсказать результаты этих опытов.

Постепенно выяснилась интересная особенность: все формулы, которые описывают свойства квантовых объектов, непременно содержат постоянную Планка h . Более того, если физик видит уравнение, в которое входит квант действия h , он безошибочно заключает отсюда, что перед ним уравнение квантовой механики.

На этом основании квантовую механику можно было бы определить как систему уравнений, в которых присутствует постоянная Планка h . Однако такое определение может лишь успокоить наше стремление к однозначности и формальной строгости, но ничего не может дать по существу: название науки должно указывать на предмет её изучения, а не только на метод, которым эта цель достигается.

Мы могли бы определить атом как физический объект, волновые и корпускулярные свойства которого одинаково существенны для полной его характеристики. Однако и такой подход заведомо

не исчерпывает всех свойств квантового объекта, хотя и фиксирует изначально присущий ему дуализм. После многочисленных попыток ответить на вопрос «Что такое атом?» можно было бы, например, сказать: «Атом — это всё то, что мы теперь о нём знаем». Но, конечно, и это не определение, а благовидный предлог его избежать.

Какими словами коротко и без разнотечений можно определить *понятие* «атом»? Мы неоднократно убеждались, что ни одно слово нашей речи не в состоянии вместить всё его многообразие и сложность. Тогда мы обратились к уравнениям квантовой механики и с помощью формул, минуя строгие определения, построили для себя *образ* атома. При этом мы сознательно следовали принципам квантовой физики.

Один из них предписывает по возможности избегать разговоров о явлениях самих по себе, безотносительно к способу их наблюдения. Понятия «явление» и «наблюдение» существуют независимо только в нашем сознании, да и то с ограниченной точностью. Для физика оба эти понятия — две стороны одной и той же физической реальности, которую он изучает и в объективное существование которой безусловно верит. Они несовместимы: наблюдение разрушает первозданное явление. Но они равно необходимы: без наблюдения мы вообще ничего не знаем о явлении. Их сложное единство и взаимодействие не позволяют нам постичь явление само по себе, но они помогают нам раскрыть *связи* между явлениями.

Эти связи мы можем записать с помощью формул и рассказать о них словами. Однако слова повисают в воздухе, если рядом с ними не написаны формулы. А формулы мертвы до тех пор, пока мы не нашли способа объяснить, что они на самом деле означают. Для полного объяс-

нения «явления—наблюдения» необходимо гармоничное сочетание понятий и формул. Лишь после этого можно создать для себя удовлетворительный образ физического явления.

На этом этапе цепочка познания новой физики ещё раз видоизменяется, усложняется и приобретает вид

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{явление} \\ \text{наблюдение} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} \text{понятие} \\ \text{формула} \end{array} \right\} \rightarrow \text{образ}$$

В продолжение всех попыток определить понятие «атом» и представить себе его образ мы инстинктивно стремились к этой схеме.

Образ, на древнегреческом *πῖδος* — эйдос — *идея* — центральное понятие философии Платона. Согласно его учению, **идея** любого явления существует вне его самого, над ним и независимо от него и проявляется по-разному в зависимости от конкретных условий наблюдения явления. Аристотель, в отличие от своего учителя Платона, не считал идеи врождёнными и вечными: он был убеждён, что они появляются как результат обобщения и осмысления опыта (в их время ещё очень ограниченного).

Нынешние физики начинают своё обучение с формул. Наверное, это разумно: при изучении любого иностранного языка лучше сразу учиться говорить, а не выяснять каждый раз, почему то или иное слово произносится так, а не иначе. Вслед за формулами физики усваивают слова, которые необходимо при этом произносить и без которых общение между людьми затруднительно. Однако формулы не имеют точных словесных эквивалентов. Поэтому обучение современной физике состоит в том, чтобы объяснять непривычные явления привычными словами, но каждый раз немного с новой точки зрения. Тем самым добиваются перехода

новых понятий из сферы логической и сознательной в сферу интуитивную и подсознательную — условие, необходимое для любого творчества.

Такой способ обучения физиков неумовимо деформирует систему их образов, понятий и даже систему ассоциаций. Как всякого человека, хорошо владеющего иностранным языком, физиков коробят безукоризненно правильные словесные конструкции большинства научно-популярных книг: в них они безошибочно различают чужеродный акцент. Невозможно адекватно передать смысл иностранной фразы, не разрушив при этом её первоначальную структуру. Язык, на котором общаются между собой физики, только по названию и отдельным словам русский, английский или ещё какой-то. В действительности это особый язык, словарь и грамматические конструкции которого приводят в отчаяние литературных редакторов. Но при всякой попытке «причесать» корявую физическую фразу в соответствии с нормами литературного языка она что-то теряет, — как иностранные стихи даже в хорошем переводе.

Непричёсанная физическая правда состоит в том, что:

квантовая механика — это система формул, понятий и образов, которая позволяет объяснить и предсказать наблюдаемые свойства квантовых объектов;

квантовый объект — это физическая реальность, дуальная в своей первооснове, свойства которой можно описать с помощью уравнений квантовой механики.

Два приведённых определения, поставленные рядом, выглядят как насмешка над здравым смыслом. Их точный смысл и в самом деле нельзя вполне понять, если использовать их порознь: только взятые вместе они становятся осмысленными.

Конечно, для того чтобы понять и представить себе всё многообразие и единство квантовых явлений, одних формальных определений недостаточно: нужно знать их истоки и эволюцию. Именно поэтому мы так долго и тщательно знакомимся с опытами, из которых впоследствии выкристаллизовалось понятие «квантовый объект». Само по себе, в отрыве от этих опытов, оно ничего не означает; оно лишь закрепляет на языке формальной логики тот интуитивный образ, который постепенно формируется в нашем сознании во многом помимо нашей воли. Наше теперешнее определение квантовой механики почти дословно совпадает с тем, которое мы привели в самом начале книги. И если теперь оно звучит для вас по-другому, значит, всё остальное вы прочли не напрасно. Теперь, наконец, можно дать энциклопедическое определение предмета нашего интереса:

Квантовая механика — это наука о физических явлениях, обусловленных наличием в природе наименьшего кванта действия h .

Рассказ о квантовой механике на этом можно было бы закончить, если бы не одно важное обстоятельство. Дело в том, что, сказав слова: «Атом — это физическая реальность...», мы невольно коснулись обширной пограничной области между физикой и философией.

Физическая реальность — последнее понятие, к которому неизбежно приходят при любой серьёзной попытке объяснить что-либо в физике. В силу своей универсальности оно настолько обширно и всеобъемлюще, что определить его только средствами физики положительно невозможно. Для этого необходимо привлечь философию с её понятием объективной реальности.

Как известно, объективная реальность — это всё то, что есть и было, независимо от нашего сознания. Однако

для науки такое определение недостаточно конкретно, поскольку оно ни к чему не обязывает, кроме веры в объективную сущность познаваемого мира. А в это все учёные верят — иначе они не отдавали бы всю свою жизнь познанию этой реальности. Однако мнения о *природе* физической реальности, её истинности и однозначности — сильно расходятся. Большая часть физиков признаёт, что физическая реальность — это та часть объективной реальности, которую мы познаём с помощью опыта и нашего сознания, то есть все те факты и числа, которые мы получаем с помощью приборов, а также их обобщения на языке понятий, придуманных учёными.

Суждения — очень зыбкая вещь. Почему же мы уверены, что картина физической реальности, добытая таким путём, истинна? Или более мягко (кто знает, «что такое истина?»), — почему мы убеждены, что эта картина единственно возможна?

Физическая реальность

Зайдите в любую физическую лабораторию и попытайтесь с порога определить, какое явление природы в ней изучают. Вы увидите перед собой нагромождение приборов и путаницу проводов, за которыми нельзя разглядеть не то что явление, но даже физиков, которые призваны его изучать. В этой обстановке такие, например, слова: «Мы изучаем здесь расщепление спектральных линий в магнитном поле» — могут вызвать лишь вежливое внимание, но отнюдь не доверие.

Даже когда вам в руки дадут фотопластинку и вы увидите на ней узкие чёрные линии, — у вас не возникнет никаких ассоциаций с атомами, из недр которых (как станут убеждать вас физики) испущены те самые лучи, которые впоследствии были преобразованы спектроскопом и оставили следы на фотопластинке.

Для человека, непричастного к физике, все эти объяснения выглядят очень неубедительно. Ему более или менее понятно, как по стуку мотора механик определяет его неисправность, или как врач, выслушав жалобы больного, ставит диагноз. Потому что он знает: всегда можно разобрать мотор, — детали его при этом не изменятся, — и можно, на худой конец, произвести вскрытие, чтобы убедиться в правильности диагноза. В обоих случаях известны все части, из которых устроено целое. Даже если вы не часовщик, то, разобрав часы, вы сможете понять, как они работают и почему видимое движение их стрелок не похоже на невидимое обычно движение их пружин и колёсиков.

С атомами всё много сложнее. Мы наблюдаем внешние проявления их свойств: спектры, цвет тел, их теплоёмкость и кристаллическую структуру, но мы не можем после этого открыть «крышку часов» и посмотреть, как атом устроен «на самом деле». На основе совокупности фактов, понятий и формул мы создали для себя некоторый образ атома. Но поскольку не существует никакого независимого способа проверить этот образ, то возникает естественный вопрос: а нельзя ли придумать другой образ атома, который, однако, приводил бы к тем же самым наблюдаемым следствиям?

Вопрос этот не праздный, им занимались почти все великие физики. Житейский скептический ум формулирует его несколько проще: «Всё, что вы придумали, — неправда, на самом деле всё не так!» Такое возражение трудно опровергнуть, потому что понятие «на самом деле» тоже не определено. В общежитейском смысле «на самом деле» существует лишь то, в чём можно удостовериться, опираясь на показания наших пяти чувств, либо же то, в чём мы можем убедиться с помощью приборов — продолжений наших чувств. Даже с последним

утверждением согласились далеко не сразу: современники Галилея упрекали его в том, что открытия солнечных пятен и спутников Юпитера на самом деле не открытия, а ошибки зрительной трубы, которой он пользовался.

Предположим, что мы ушли вперёд со времён Галилея и верим в истинность показаний приборов. Тогда остаётся ещё свобода для толкования этих показаний. Вопрос «на самом деле» теперь означает: «Насколько однозначно толкование опытов относительно явлений, недоступных непосредственному чувственному восприятию?» Здравый ум человека, даже причастного к науке, должен признать, что такое толкование неоднозначно. После беглого посещения физической лаборатории это априорное убеждение может только укрепиться. Но физики-то знают, что факты и понятия их науки допускают свободу толкования только в процессе их открытия и становления: как только они включены в общую систему физических знаний и согласованы с ними — изменить их практически невозможно, если не переходить при этом границ их применимости. (Попробуйте выбросить фразу из хорошей поэмы, хотя, казалось бы, всё это — чистейший «поэтический вымысел».)

При углублении и уточнении системы научных знаний мы вынуждены всё дальше и дальше отходить от непосредственных чувственных восприятий и от понятий, которые возникли на их основе. Такой процесс абстракции необратим, но не следует огорчаться по этому поводу: мы вправе гордиться тем, что наш разум способен понять даже то, чего мы не в состоянии представить. В современной физике таких примеров — множество: достаточно вспомнить закон инерции Галилея или принцип неразличимости электронов. Эти абстракции противоречат повседневному опыту, основанному на свидетельствах наших

несовершенных чувств: в жизни тела движутся только под действием сил и среди них нет двух в точности одинаковых. Но плодотворность этих абстракций доказана их многочисленными следствиями.

Абстрактность научных понятий — такая же необходимость, как изобретение буквенного письма взамен древних рисунков и иероглифов. Ни одна буква в слове «носорог» не похожа на него самого, и тем не менее всё слово безошибочно вызывает в воображении нужный образ. Всем очевидно, что нынешняя культура немыслима без книгопечатания. Но далеко не каждому ясно, что без дальнейшей абстракции научных понятий развитие науки невозможно. Одним словом, абстрактная наука, как и музыка, требует не оправдания, а глубокого понимания: только с её помощью можно познать непривычную квантовую реальность, хотя реальность эта совсем иного рода, чем весомые и зримые камни или деревья.

Но даже эту «абстрактную реальность» человек всегда пытается представить *наглядно*, то есть свести её к небольшому числу проверенных образов. Такое стремление заложено в человеке очень глубоко, и поэтому у физиков постепенно развилась своя причудливая система образов, которая, быть может, ничему реальному в природе не соответствует, о ней нельзя рассказать словами, но тем не менее она помогает отыскивать связи между явлениями в моменты наивысшего напряжения мысли.

Те цепочки познания, которые мы рисовали, — от явления, через понятия и формулы, к образам, — не более чем схемы, дающие довольно слабое представление о сложных процессах, происходящих в сознании учёного, когда в беспорядочном наборе фактов он пытается увидеть простые связи, определить их словами и найти им место в общей картине природы.

Отдельное слово ещё не образует языка, — необходим набор слов и правила грамматики, по которым они сочетаются. Точно так же отдельный научный факт, каким бы важным он ни казался, ещё ничего не означает сам по себе, если неизвестно его место в общей системе знаний, и лишь вместе со своим толкованием он получает смысл и значение. «Теоретическая система практически однозначно определяется миром наблюдений, хотя никакой логический путь не ведёт от наблюдений к основным принципам теории», — писал Эйнштейн.

Вспомните историю *D*-линии натрия. Её наблюдал уже Фраунгофер, но разве мог он подозревать, что держит в руках ключ ко всей квантовой механике? Он видел, что *D*-линия расщеплена на два компонента. Но разве знал он, что это — влияние спина электрона? Электрон, квантовая механика, спин — во времена Фраунгофера эти понятия ещё не были определены. А без них *D*-линия натрия — просто любопытный факт, не ведущий ни к каким глубоким следствиям. Лишь после опытов Крукса, Зеемана, Томсона, Резерфорда, после создания системы понятий и формул, которую назвали квантовой механикой, стало ясно, что *D*-линия натрия — это один из тех фактов, понимание смысла которых меняет самую основу наших представлений о Природе.

Понятия возникают на основе новых фактов — с этим согласны все. Однако не все отдают себе отчёт в том, насколько смысл новых фактов зависит от понятий, которые используются для их толкования. Гармонию явлений атомного мира мы можем оценить лишь благодаря теории: всякое описание одной лишь экспериментальной установки будет безнадежно скучным и неинтересным. Теория делает картину природы не только связной, но также и эстетически приемлемой. «Лишь

идеи делают экспериментатора — физиком, хронолога — историком, исследователя рукописей — филологом», — писал и говорил Планк.

Теория — это проникновение в сущность наблюдаемых явлений, позволяющее описать и объяснить видимую сложность явлений их невидимой простотой. Знаменитый пример такого рода — открытие Коперника, который вопреки каждодневной очевидности восхода и захода Солнца узрел его неподвижность и объяснил это явление неочевидным вращением Земли. Именно эта форма мышления гением учёных, подобных Дальтону и Бору, создала современную атомистику. (*Simplex sigillum veri*, простота — печать истины, — начертано у входа на физический факультет Гёттингенского университета.)

Сложное переплетение фактов, понятий, формул и образов науки очень трудно, да, пожалуй, и невозможно распутать. При всех попытках подобного рода мы неизбежно придём к сакраментальному вопросу: «Что возникло раньше: яйцо или курица?» Никто никогда не узнает тот первый научный факт и то первое научное понятие, с которых началась нынешняя наука. Поэтому всё чаще вместо «объяснения природы» естествоиспытатели говорят об описании природы.

«Мы теперь лучше, чем прежде естествознание, сознаём, что не существует такого надёжного исходного пункта, от которого бы шли пути во все области нашего познания, но что всё познание, в известной мере, вынуждено парить над бездонной пропастью. Нам приходится всегда начинать где-то с середины и, обсуждая действительность, употреблять понятия, которые лишь постепенно приобретают определённый смысл благодаря их применению...», — писал Гейзенберг. И добавлял: «Значения всех понятий и слов, возникающих при нашем взаимо-

действии с миром, не могут быть точно определены... мы никогда точно не знаем, где лежат границы их применимости. Поэтому путём только рационального мышления никогда нельзя прийти к абсолютной истине». Бор соглашался с ним: «Мы должны признать, что ни один опытный факт не может быть сформулирован вне некоторой системы понятий и что всякая кажущаяся дисгармония между опытными фактами может быть устранена только путём надлежащего расширения этой системы понятий». «Единственная загадка мира — его познаваемость», — часто повторял Эйнштейн.

Физическая реальность — глубокое понятие и, как все глубокие понятия нашего языка, неоднозначно. Это понятие первично, и его нельзя достаточно строго определить логически через более простые. (Трудно определить очевидное.) Его необходимо принять, предварительно вложив в него тот смысл, который диктует нам вся наша прежняя жизнь и приобретённые в ней знания. Очевидно, что с развитием науки смысл этот меняется, — точно так же, как и смысл понятия «атом». (Знаменательно, что в самой точной науке — математике — базовые понятия: «точка», «прямая», «множество» — тоже нельзя строго определить.)

С приходом науки понятие реальности изменилось неузнаваемо, и реальность человека XX века так же далека от реальности древних греков, как современный атом от атома Демокрита. Решающие штрихи в новой картине физической реальности дорисовала квантовая физика. Пожалуй, это главная причина, которая будит желание людей понять, «что такое квантовая механика». Как правило, стремление это глубже, чем естественный профессиональный интерес. Дело в том, что при изучении квантовой механики человек приобретает не только специальные на-

выки, позволяющие ему рассчитать лазер или атомный котёл. Знакомство с квантовой механикой — это некий эмоциональный процесс, который заставляет заново пережить всю её историю. Как всякий нелогический процесс, он строго индивидуален и оставляет неистребимые следы в сознании человека. Это абстрактное знание, приобретённое однажды, необратимо влияет на всю последующую жизнь человека: на его отношение к физике, к другим наукам и даже на его моральные принципы. Вероятно, так же изменяет человека изучение музыки.

Прочитав предыдущие главы, вы познакомились только с мелодией квантовой механики и, быть может, научились брать несколько звучных аккордов. Конечно, только музыкант вполне оценит глубину музыкального замысла, и только физик способен испытывать эстетическое удовольствие от красоты формул и физических принципов, и те из вас, кто посвятит себя науке, быть может, поймут это со временем. Однако, если, не вникая в «законы гармонии» квантовой механики, вы всё же почувствовали красоту её «мелодии» — задача предыдущего рассказа выполнена.

Вокруг кванта

От относительного к абсолютному



На высокую башню можно подняться только по винтовой лестнице.

Фрэнсис Бэкон

Лекцию с таким названием Макс Планк прочёл в Мюнхене 1 декабря 1924 г. — четверть века спустя после своего исторического открытия. В ней он представил развитие науки как подъём от относительного знания к абсолютному. И приводил примеры: атомная масса, которую в течение столетия понимали как отношение массы любого атома к массе атома водорода, в конце концов получила самостоятельное, абсолютное значение; температура, которую долгое время понимали как значение относительно произвольно выбранной величины (например, температуры замерзания воды, 0 °C), после трудов лорда Кельвина обрела абсолютный нуль (−273,15 °C); энергия, которую всегда мыслили как разность между начальным и конечным состоянием системы, после возникновения теории относительности обрела абсолютный смысл в формуле Эйнштейна $E_0 = mc^2$ (Планк специально подчеркивает этот парадокс); точно то же благодаря Больцману произошло и с энтропией.

Планк мог бы добавить сюда и заряд электрона, и скорость света, и квант действия, открытый им. Вскоре после его лекции квантовая механика пополнит этот список: соотношение неопределённостей, принцип неразличимости частиц и концепция физического вакуума.

В поисках последних понятий

Мысли философа — как звёзды, они не дают света, потому что слишком возвышенны.

Фрэнсис Бэкон

На Сольвеевском конгрессе 1927 г., том самом, где квантовая механика в докладе Бора предстала как новая законченная теория атомных явлений, Лоренц говорил: «Для меня электрон является частицей, которая в каждый данный момент находится в определённой точке пространства; и если я воображаю, что эта частица в следующий момент будет находиться в другой точке, то я должен представить себе её траекторию в виде линии в пространстве... Мне хотелось бы сохранить этот прежний научный идеал — описывать всё происходящее в мире при помощи ясных образов». Лоренц — выдающийся голландский физик на рубеже веков — выразил общее умоностроение учёных того времени. Само по себе такое направление мыслей легко понять: всякая новая теория неизбежно должна преодолевать инерцию устоявшихся стереотипов мышления. Удивительно другое: как много великих физиков, включая и создателей квантовой механики, сомневались в её основах и законченности. Среди них — Планк, Эйнштейн, Шрёдингер, де Бройль, Лауэ, Ланде... Причём с годами их сомнения крепили — несмотря на впечатляющие успехи квантовой механики. (Вероятно, это было одной из причин, по которой Макс Борну Нобелевская премия была присуждена лишь в 1954 г. — через 28 лет после его знаменитой работы о статистической интерпретации волновой функции.)

Летом 1926 г. Эйнштейн писал Бессо: «К квантовой механике я отношусь восхищённо-недоверчиво». Уже в следующем году, на Сольвеевском конгрессе, его позиция вполне определилась и с годами становилась всё более непримиримой.

31 мая 1928 г. он писал Шрёдингеру: «Философия успокоения Гейзенберга—Бора (или религия?) так тонко придумана, что предоставляет верующему до поры до времени мягкую подушку, с которой его не так легко спугнуть. Пусть спит...»

7 ноября 1944 г. он пишет Борну: «Большой первоначальный успех квантовой теории не может заставить меня поверить в лежащую в основе всего игру в кости». («*Gott würfelt nicht!*» — «Бог не играет в кости!» — повторял Эйнштейн до конца жизни.)

Будь другом истины до мученичества, но не будь её защитником до нетерпимости.

Пифагор

За три года до смерти, 12 декабря 1951 г., он напишет Бессо: «Все эти пятьдесят лет бесконечных размышлений ни на йоту не приблизили меня к ответу на вопрос: что же такое кванты света? В наши дни любой мальчишка вообра-

Истину нельзя объяснить так, чтобы её поняли; надо, чтобы в неё поверили.

Уильям Блейк

Я думаю, что смело могу утверждать: квантовую механику не понимает никто.

Ричард Фейнман

жает, что ему это известно. Но он глубоко ошибается...» В своих сомнениях Эйнштейн был не одинок.

«Квантовую механику нельзя считать полностью завершённой», — писал Планк даже в 1941 г.

Лауэ уже в начале 30-х годов считал толкование Бора основ квантовой механики «дурным паллиативом», а в апреле 1950 г. писал Эйнштейну: «Ты и Шрёдингер — единственные из известных современников, которые в этом деле являются моими единоверцами». А Шрёдингер, когда ему указывали на успехи квантовой механики и её повсеместное признание, сердился: «С каких это пор верность научного положения решается большинством голосов?» — писал он Борну в 1950 г.

Знаменательно, что все эти утверждения так или иначе содержат упоминание о вере. Эйнштейн и Шрёдингер, Планк и Лауэ — все они признавали могущество квантовой механики, но **не верили** в её завершённость, хотя все их попытки **доказать** её неполноту или противоречивость заканчивались неудачей. Их позиция требовала мужества: копенгагенская интерпретация довольно скоро стала догмой и любая попытка усомниться в её основах могла стоить физика его профессиональной репутации. И тем не менее споры о квантовой физике продолжают по сей день, издаётся даже несколько специализированных журналов, целиком посвящённых проблеме интерпретации квантовой механики. Своей ожесточённостью и непримиримостью споры эти напоминают иногда вражду религиозных сект. Никто из спорящих не подвергает сомнению существование бога квантовой механики, но каждый мыслит себе своего бога — и только своего. И, как всегда в религиозных спорах, логические доводы здесь бесполезны, ибо противная сторона их просто не в состоянии воспринять: существует первичный эмоциональный барьер, акт веры, о который разбиваются все неопровержимые доводы оппонентов, так и не успев проникнуть в сферу сознания.

Сомнения физиков в основах квантовой механики отнюдь не способствуют укреплению доверия к ней у массы неспециалистов. Но задача истинного учёного не в том, чтобы любой ценой утвердить свои взгляды и авторитет, а в том, чтобы отыскать истину и подчиниться ей, даже если она противоречит его априорным убеждениям.

В чем суть этого нескончаемого спора? Он сродни попыткам отыскать главную истину и последнее понятие, из которых логически следуют все остальные. При всём многообразии сомнений противников ортодоксальной тео-

Сомневаться во всём, верить всему — два решения, одинаково удобные: и то и другое избавляет нас от необходимости мыслить.

Анри Пуанкаре

Общее согласие — самое дурное предзнаменование в делах разума.

Фрэнсис Бэкон

рии и изощрённости обсуждаемых ими парадоксов суть их возражений сводится к отрицанию вероятностной интерпретации квантовой механики и принятого в ней определения «состояние физической системы».

Например, каждому радиоактивному элементу можно поставить в соответствие характеристику — его период полураспада, то есть время, за которое распадается половина имеющихся ядер. С этим фактом согласны все — благо он легко проверяется. Однако при этом сторонники существующей квантовой механики убеждены, что период полураспада — одновременно и характеристика каждого отдельного ядра: точно так же, как $1/2$ — это вероятность появления герба в каждом отдельном бросании монеты. Оппоненты не согласны с этим и апеллируют к очевидности: ведь каждое индивидуальное ядро распадается хотя и в случайное, но вполне определённое, **своё** время, не совпадающее со средним временем жизни ядра, которое поэтому — не более, чем удобная фикция, не имеющая отношения к физической реальности. Им отвечают, что квантовая механика запрещает использовать понятия, соответствующие ненаблюдаемым свойствам, подобным времени жизни индивидуального ядра. Но оппоненты отказываются принять это объяснение: для них оно выглядит как насмешка над здравым смыслом.

Одно из наиболее часто дискутируемых явлений — дифракция электронов при прохождении их через два близко расположенных отверстия. Обе стороны соглашались, что след на фотопластинке может оставить только электрон-частица. Но тогда — и это рассуждение вполне логично — он должен пройти только через одно из отверстий, то есть интерференционная картина становится невозможной, поскольку она является результатом одновременного прохождения волны через оба отверстия. Сторонники традиционной квантовой механики напоминают о дуализме волна—частица и о дополнительных типах приборов. С их точки зрения два отверстия — это прибор, выделяющий волновые свойства электрона, а фотопластинка — прибор, фиксирующий его корпускулярные свойства.

Противников такое объяснение ни в коей мере не убеждает, поскольку квантовая теория в *принципе* не позволяет проследить, как же происходит этот переход от корпускулярной картины к волновой. Им объясняют, что это чисто статистический процесс, которым управляют законы теории вероятностей. На это они отвечают словами Карла Поппера, который писал, что Гейзенберг пытается «дать причинное объяснение невозможности причинных объяснений», проти-

Развитие человечества не находится ещё в столь блестящем состоянии, чтобы истина была доступна большинству. Одобрение толпы — доказательство полной не состоятельности.

Сенека

Каждому человеку свойственно заблуждаться, упорствовать в заблуждениях свойственно только глупцу.

Цицерон

вопоставляют авторитет Лауэ, который отказался принять принцип неопределённости Гейзенберга, ибо «он ставит предел поискам более глубоких причин», и точку зрения Эйнштейна, который всегда настаивал, что вероятность — это наш способ представлять экспериментальные факты, а не внутреннее свойство квантовых систем.

Многочисленные оппоненты до сих пор не могут смириться с тем, что в рамках квантовой механики все вопросы об истинных характеристиках индивидуальных квантовых объектов и ненаблюдаемых явлений строго запрещены. Чтобы преодолеть этот запрет, было сделано множество попыток ввести в теорию так называемые *скрытые параметры*, детально описывающие «истинные» свойства объектов, знание о которых мы потом утрачиваем, усредняя по введенным параметрам. (Такую возможность, как и сам термин «скрытые параметры», обсуждал уже Макс Борн в своей статье 1926 г.) Все эти попытки, однако, до сих пор остались бесплодными и ничем не обогатили квантовую теорию. Спорам об интерпретации квантовой механики не видно конца: гордость человека и его вера во всемогущество разума нелегко смиряются с открытыми им же пределами знания. Не все относятся к этим спорам одинаково серьёзно: «Великая армия в своем движении в неизвестное дискутирует с интересом, а порой забавляясь канителью споров о том, что такое реальность и что такое истина», — говорил Резерфорд.

Характерно, что никто из оппонентов не отрицает достоверности и истинности заключений квантовой механики в области её применимости. Нильс Бор хорошо сознавал этот слабый пункт позиции несогласных и с присущим ему мягким юмором любил рассказывать историю о своем соседе по загородному дому в Тисвилде. У этого соседа на двери была прибита подкова. Однажды его спросили, неужели он и в самом деле верит, что она приносит в дом счастье. «Нет, конечно, — ответил сосед, — но, говорят, она помогает даже тем, кто в неё не верит».

Но «не хлебом единым жив человек», и пока не исчезли бескорыстные сомнения, спор этот нельзя считать завершённым. Он, конечно, не изменит основ существующей теории, но, быть может, облегчит поиски новых путей и понимание вновь открываемых явлений.