

ФИЗИКА

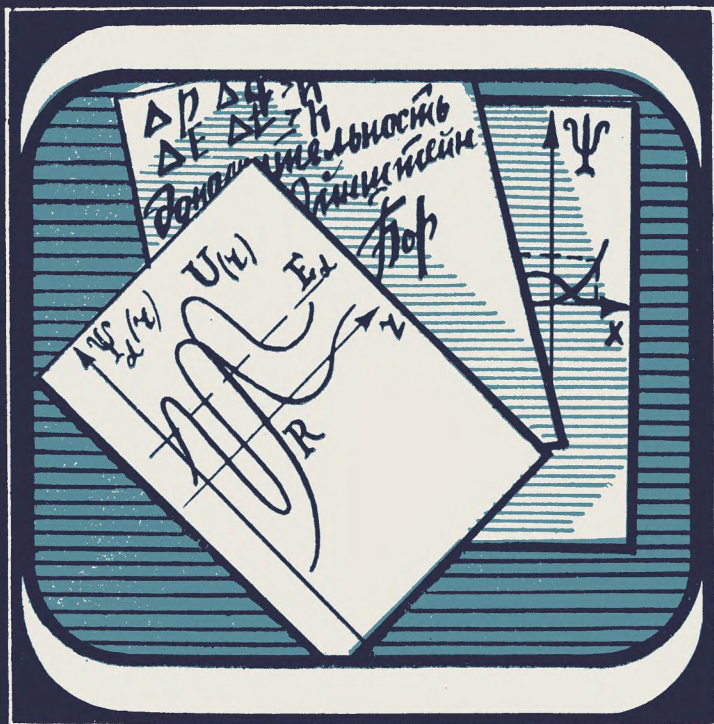
ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1987/3

А. Б. Мигдал

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА И НИЛЬС БОР



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

3/1987

Издается ежемесячно с 1967 г.

А. Б. Мигдал

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА И НИЛЬС БОР



Издательство «Знание» Москва 1987

МИГДАЛ Аркадий Бенедиктович — академик, заведующий
отделом Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау
АН СССР.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ	4
Излучение черного тела 4. Гипотеза световых квантов 10. «О строении атомов и молекул» 14. Квантовая физика до 1923 г. 20. Новая квантовая теория 21.	
II. ЗАДАЧИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ	25
Квантование в ящике 25. Квантовый осциллятор 26. Квантование в атоме 29. Квантование вращения 30. Рас- сеяние частиц 32. Прохождение через барьер 34.	
III. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ . . .	37
Физика и философия 37. Нильс Бор 41. Соотношение не- определенностей и дополнительность 46. Особенности квантовой теории 49. Спор Бора с Эйнштейном 53.	
IV. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ .	57
Свойства пустоты 57. Квантовая механика вакуумных полей 59. Поиски единства 64.	

Мигдал А. Б.

М 57 Квантовая физика и Нильс Бор. — М.: Знание,
1987. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике.
Сер. «Физика»; № 3).
11 к.

В популярной форме излагается история развития квантовой фи-
зики от ее зарождения до создания квантовой механики.

Основные задачи квантовой механики — квантование в различ-
ных потенциалах, рассеяние, прохождение через барьер — решают-
ся на качественном уровне.

Прослежены события научной жизни Нильса Бора, сформиро-
вавшие его как философа квантовой физики. Подробно рассматрива-
ются физические и философские основы квантовой теории.

Обсуждается дальнейшее развитие квантовой физики: квантовая
механика релятивистских частиц и применение квантовой механики к
электромагнитному и другим полям.

1704020000

ББК 22.314

Как возникает теория? Вот самый естественный на первый взгляд путь. Сначала в результате анализа накопленных экспериментальных и теоретических знаний появляется ясная и глубокая физическая идея, скажем, «движение небесных тел и падение камня на Землю вызваны одной причиной» или «время течет по-разному в неподвижной системе отсчета и в равномерно движущейся», а затем, как результат глубокого понимания, создается теория. Из первой идеи Ньютон вывел свою теорию тяготения, из второй — Эйнштейн — теорию относительности. С важнейшей физической теорией современности — квантовой теорией — все было не так. Важнейшие результаты возникали раньше, чем становился понятным их смысл!

На примере создания квантовой теории можно увидеть в действии множество методических особенностей современной теоретической физики. Это было движение в полутьме, на ощупь, через смутные догадки, которые часто не подтверждались и уводили в сторону, но зато удачи были поразительны: ученые оказывались провидцами — их утверждения, построенные на шатких основаниях, точнейшим образом подтверждались позже.

В рассказах о важных открытиях обычно о неправильных догадках не говорят или говорят вскользь, и история науки представляется сплошной чередой оправдавшихся озарений. Разумеется, это не так. История идей полна драматизма.

Постараемся проследить и почувствовать сложный и необычный ход идей, который привел к созданию квантовой физики.

І. ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА

В конце прошлого века одной из важных задач физики было экспериментальное и теоретическое исследование теплового излучения «черного тела». Черным называли такой предмет, который не отражает, а только поглощает свет. Черное тело можно осуществить, сделав ящик с непроницаемыми, нагретыми стенками, тогда внутри ящика в результате многократных испусканий и поглощений света, т. е. электромагнитного излучения, стенками устанавливается «равновесное» излучение. Это и есть излучение черного тела. Его можно наблюдать, проделав в стенке ящика небольшое отверстие (чтобы не нарушить равновесие)

Еще в середине прошлого века, в 1859 г., Густав Кирхгоф установил удивительный закон: в тепловом равновесии отношение излучающей способности тела к поглощающей есть универсальная функция $K(\nu, T)$ от частоты и температуры — «функция Кирхгофа». Согласно закону Кирхгофа интенсивность излучения черного тела не зависит от вещества, из которого сделаны стенки, и от устройства тела, а только от частоты и температуры.

Доказательство этого закона основывалось на невозможности существования «перпетуум-мобиле второго рода» — так называется получение энергии за счет перехода тепла от холодного тела к нагретому. Если бы функция Кирхгофа не была универсальной, можно было бы осуществить такой «вечный двигатель». Таким образом, доказательство Кирхгофа основывалось на прочно установленных к тому времени законах термодинамики. Общность этого закона и незыблемость его доказательства не могли не волновать теоретиков и экспериментаторов. Попытки найти функцию $K(\nu, T)$ продолжались до начала XX века.

В 1886 г. Вильгельм Вин, анализируя эксперименты по излучению черного тела, пришел к заключению, что энергия излучения на единицу объема и единицу частоты падает по экспоненциальному закону с увеличением

отношения ν/T (закон Вина). Это предположение, как стало ясно позже, подтверждается экспериментально только для больших ν/T .

Приблизительно в это же время теорией излучения черного тела начинает заниматься Макс Планк. Он занялся целью теоретически получить распределение по частотам интенсивности электромагнитного излучения черного тела, т. е. объяснить эмпирический закон Вина, который, как мы сейчас увидим, резко противоречит классической статистической физике.

Статистическая физика установила замечательный закон «равнораспределения энергии»: в тепловом равновесии на каждую степень свободы приходится одинаковая энергия. Так, на каждое возможное независимое электромагнитное колебание в тепловом равновесии внутри черного ящика приходится энергия, равная kT , где T — абсолютная температура стенок, а k — постоянная Больцмана.

Если в ящике от стенки до стенки укладывается целое число полуволн, то в нем образуются стоячие волны. Чем меньше длина волны, тем больше возможностей выполнить это условие, т. е. больше число возможных колебаний. Поскольку в ящике могут образовываться волны сколь угодно малых длин, число всех возможных стоячих электромагнитных волн бесконечно. Если на каждое колебание приходится одна и та же энергия, а число колебаний растет с увеличением частоты (уменьшением длины волны), то и интенсивность излучения должна расти с частотой, что противоречит закону Вина. Но главное, бесконечное число стоячих волн в ящике должно было бы забрать на себя всю энергию стенок, сколько бы тепла мы к ним ни подводили. Если бы на каждое колебание действительно приходилась энергия kT , то, сделав в ящике дырку, мы получили бы источник ни с чем не сравнимой яркости. Этому парадоксу дали позже драматическое название «катастрофа Рэля — Джинса» или «ультрафиолетовая катастрофа». Все вокруг нас, и мы сами в том числе, должно было бы охладиться, все тепло перешло бы в «бездонную бочку излучения». На опыте, к счастью, никакой катастрофы не происходит (рис. 1).

Макс Планк был убежденным сторонником классической физики, но, пытаясь найти выход из этого противоречия, обнаружил, что единственная возможность объ-

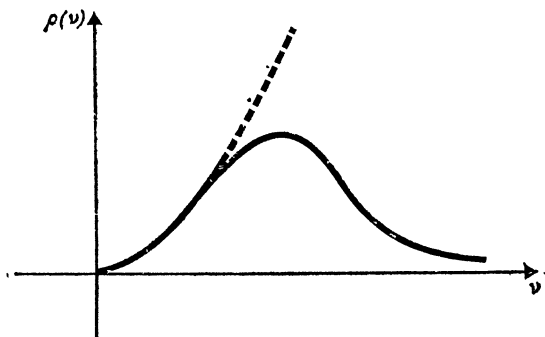


Рис. 1. Зависимость интенсивности черного излучения от частоты. Пунктиром показан ход интенсивности, соответствующий классической статистической физике (закон Рэля — Джинса)

яснить закон Вина — это предположить, что частицы, излучающие волны с частотой ν , могут изменять свою энергию только скачкообразно, дискретными порциями $h\nu$, где ν — частота волны, а h — коэффициент пропорциональности, вошедший в науку как «постоянная Планка».

Нагретые стенки ящика можно условно заменить набором излучателей всевозможных частот. Как будут возбуждены излучатели в тепловом поле? Излучатели малой частоты будут вести себя как полагается по правилам классической статистической физики, для них скачкообразность энергии не существенна. Каждый из них приобретет энергию kT , где T — температура стенок. Но излучатели, имеющие большую частоту, для которых $h\nu$ много больше, чем средняя тепловая энергия, равная kT , почти все будут в состоянии с наинизшей энергией. Чтобы их возбудить, необходимо передать им энергию $h\nu \gg kT$, а согласно законам классической статистической физики это событие маловероятно, так что возбуждена лишь малая доля таких излучателей, и поэтому интенсивность излучаемого ими света мала. Так объясняется закон Вина. Излучатели высокой частоты оказываются как бы «замороженными» в состоянии с минимальной энергией и вносят малый вклад в тепловую энергию. Парадокс Рэля — Джинса разрешается.

Численное значение h , полученное из экспериментов по распределению интенсивности излучения, оказалось

равным $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·с. Понятно, почему скачкообразность в изменении энергии излучателей не замечали в повседневной жизни — порции энергии настолько малы, что ее изменение кажется непрерывным.

Теперь, когда мы поняли в общих чертах, что такое излучение черного тела, попробуем проследить, как пришел к своей знаменитой формуле Макс Планк. В работе 1900 г. «О необратимых процессах излучения» он поставил перед собой задачу обосновать понятие температуры для излучения

Для этого Планку нужно было найти механизм, осуществляющий тепловое равновесие излучения. Поэтому он вводит осцилляторы (или резонаторы), взаимодействующие с излучением и представляющие собой как бы модель атомов. Осциллятор Планка можно представить себе, например, как электрон, колеблющийся возле положения равновесия. Сейчас мы знаем, что атом устроен не так, но это нисколько не меняет дела. Ведь по закону Кирхгофа распределение равновесного излучения не зависит от устройства атомов и должно получаться и в том случае, когда в равновесии с излучением находятся осцилляторы.

Для атомов понятия температуры и энтропии можно ввести уже известным путем и, следовательно, найти выражение для средней энергии осциллятора как функции частоты и температуры, а затем найти связь этой величины с интенсивностью излучения.

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

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

Это соотношение, согласно Планку, справедливо для любого устройства осциллятора.

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

Энергия одного электромагнитного «осциллятора» $\bar{E}_\nu = \rho / N_\nu$, и равенство Планка сводится к равенству

энергий материального и электромагнитного осцилляторов — весьма естественный результат: две системы с одинаковой зависимостью энергии от импульса и координаты в тепловом равновесии со средой имеют одинаковую среднюю энергию $\bar{E} = \bar{E}_r$.

Начиная эти работы, Планк еще предполагал, что закон Вина справедлив для всей области частот.

Из закона Вина и соотношения (1) следует, что средняя энергия осциллятора $E \sim \nu e^{-a\nu/T}$. Как мог Планк не заметить или заметить, но не обсуждать, что это выражение для средней энергии осциллятора находится в чудовищном противоречии с классической механикой и статистической физикой!? Ведь он отлично знал закон равнораспределения энергии, доказанный за тридцать лет до того Максвеллом и Больцманом, согласно которому средняя энергия осциллятора любой частоты в тепловом равновесии должна равняться kT !

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

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

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

$$\rho = \frac{8\pi\nu^3 h}{c^3 (\exp(h\nu/kT) - 1)} \quad (2)$$

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

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

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

Если бы Планк ограничился только своей удивительной догадкой, он вошел бы в науку как человек, открывший закон излучения. Но его подлинный подвиг состоял в попытке вывести угаданный им закон теоретически, и это привело к рождению квантовой теории. В 1931 г. Планк говорил, что это был «акт отчаяния... Я должен был получить положительный результат во что бы то ни стало, любой ценой». По существу, вывода не было, а причина удачи стала проявляться только после того, как Эйнштейн выдвинул свою гипотезу световых квантов. Мы не приводим этот вывод из-за недостатка места. Заметим только, что он не выдерживает серьезной критики. Прежде всего в качестве статистического объекта рассматриваются элементы энергии, которым приписывается как бы смысл частиц. Между тем после работы Больцмана было ясно, что статистику можно применять только к таким величинам, для которых есть механизм «размешивания». Кроме того, неубедительно использование связи между энергией и интенсивностью излучения, полученной классическим путем, тогда как в основе вывода лежит предположение о целочисленных порциях энергии каждого осциллятора, категорически противоречащее классической механике. И конечно, последовательное применение законов статистической физики немедленно привело бы к нежелательному результату: энергия каждого осциллятора равнялась бы kT , а для излучения возникала бы ультрафиолетовая катастрофа.

Но вместе с тем именно недостатки этого вывода не-

сут на себе печать гениальности: теперь мы знаем, что тождественные элементы энергии — это фотоны и что предположение о тождественности этих элементов соответствует тождественности фотонов — тому, что сейчас называется статистикой Бозе — Эйнштейна.

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

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

Открытие Планка стало событием, возвестившим начало квантовой эры.

ГИПОТЕЗА СВЕТОВЫХ КВАНТОВ

Известные всем опыты по интерференции и дифракции доказывают, что свет — это волна. Ньютон, пытаясь объяснить конечную скорость распространения света, предположил, что светящееся тело испускает частицы — корпускулы, — передающие свет. Но при этом ему не удалось объяснить явления интерференции и дифракции, и корпускулярная теория была надолго забыта.

Работа Эйнштейна 1905 г. «Об эвристической точке зрения на возникновение и превращение света», в которой впервые была выдвинута гипотеза световых квантов, открыла следующую важную страницу в истории квантовой физики. Эйнштейн исследовал флуктуации энергии излучения для больших значений ν/T , когда интенсивность мала и применим закон Вина. Он обнаружил интереснейший факт: флуктуации энергии точно такие, как если бы излучение частоты ν представляло газ частиц с энергией $h\nu$.

Дальше следует шаг, который делает эту работу поистине революционной.

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

Таким образом, Эйнштейн распространил планков-

скую идею квантования осцилляторов на электромагнитное излучение. С этой точки зрения планковский осциллятор изменяет свою энергию, испуская или поглощая соответствующий квант света.

Идею световых квантов Эйнштейн прежде всего применил к теории фотоэффекта.

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

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

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

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

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

Применив свою гипотезу световых квантов к явлению фотоэффекта, Эйнштейн получил $E_{\max} = h\nu - P$, где E_{\max} — максимальная энергия вылетающих электронов, а P — работа выхода — энергия, которая требуется, чтобы удалить электрон из вещества.

Таким образом, формула Эйнштейна предсказывала,

что функция $E_{\max}(\nu)$ — прямая линия с не зависящим от вещества наклоном, который определяется постоянной Планка, найденной из распределения интенсивности излучения черного тела. Было также объяснено удивительное свойство фотоэффекта — энергия вылетающих электронов совершенно не зависит от интенсивности облучающего света.

Формулу Эйнштейна можно записать и так: $E_2 - E_1 = h\nu$, где $E_2 - E_1$ — изменение энергии электрона при поглощении кванта. Подробное экспериментальное подтверждение этих соотношений было сделано только в 1915 г. Робертом Милликеном. В том же году в Гарварде Уильям Дуэн и Франклин Хант нашли еще одно подтверждение, изучая рентгеновские лучи. Верхняя граница частоты рентгеновских лучей определялась соотношением $h\nu_m = eV$, где V — потенциал, в котором ускорялись электроны. Это соотношение было предсказано Эйнштейном в его работе 1906 г.

Эйнштейновские исследования гипотезы световых квантов заканчиваются в 1916 г. работой «К квантовой теории излучения» (эта же работа была опубликована и в 1917 г.). Рассматривается равновесие между молекулами и излучением. Эйнштейн вводит вероятности индуцированного излучения и поглощения, а также вероятность спонтанного излучения. Пользуясь принципом детального равновесия, он удивительно простым путем получает формулу Планка. Затем, исследуя равновесие между молекулами и излучением, Эйнштейн заключает, что молекула, поглощая или испуская квант энергии $h\nu$, получает или отдает импульс, равный $h\nu/c$.

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

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

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

Даже после экспериментов Милликена и Дуэна и Ханта гипотеза световых квантов не вызывала у физи-

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

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

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

И все же сейчас такую предубежденность трудно понять. Кажется естественным перенести мысль о квантовании материального осциллятора на «осцилляторы», соответствующие стоячим или бегущим волнам электромагнитного поля в ящике. Это обобщение было сделано Эренфестом (1906 г.) и Дебаем (1910 г.). Они получили формулу Планка, распространив идею о дискретности возможных значений энергии на электромагнитные степени свободы. Но эта дискретность почему-то не связывалась непосредственно с проблемой дуализма волн-корпускул, хотя, возможно, Эйнштейн чувствовал эту связь и поэтому никогда не отступал от гипотезы световых квантов.

Только в 1923—1924 гг., после исследования комптон-эффекта, кванты перестали быть гипотетическими частицами. Термин «фотон» был введен Дж. Льюисом в 1926 г. в работе, где он рассматривал квант света как некий неделимый атом. Его идеи были быстро забыты,

но новый термин немедленно прижился. В октябре 1927 г. состоялся V Сольвеевский конгресс, который был посвящен «электронам и фотонам». Фотон стал полноценной элементарной частицей со спином 1, нулевой массой покоя и зарядом, равным нулю.

«О СТРОЕНИИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ»

В 1913 г. Нильс Бор распространил на атом идею о дискретности возможных значений энергии излучателей: допустимы не все орбиты электрона, а лишь некоторые. Бор установил правила для нахождения этих допустимых орбит. С классической точки зрения электрон, вращающийся вокруг ядра, должен излучать электромагнитные волны. Он движется с ускорением, а по законам классической электродинамики не излучает только заряд, движущийся по прямой с постоянной скоростью. Почему же электрон не падает на ядро, излучая свет?

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

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

В конце 1912 г. Бор, уезжая в Данию, оставил Резерфорду «Памятную записку», которая лишь частично сохранилась в архивах. В ней впервые появилась идея устойчивых орбит — догадка о неклассических закономерностях в микромире и о связи электронных орбит со строением Периодической системы элементов. В ответ он получил наставление «не спешить», очень непохожее

на Резерфорда, который сам всегда с колоссальной энергией брался за дело, доводил работы до конца, никогда не останавливаясь на полпути. Резерфорд полагал, что никто этими проблемами не занимается.

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

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

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

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

Предположение о том, что электрон может находиться не на любой орбите, а только на дозволенных, сразу же объясняло линейчатый спектр атомов: электрон испускает свет, только переходя с одной дозволенной орбиты на другую, т. е. дискретными порциями. Когда электрон находится на орбите с наинизшей энергией, ему некуда переходить (если он не получает энергию извне). Так объясняется устойчивость атомов.

Бор переосмыслил формулу Эйнштейна для фотоэффекта, предположив, что частота излучаемого света определяется соотношением $h\nu = E_2 - E_1$, где E_2 и E_1 — два возможных значения энергии атома. Но как найти энергии дозволенных орбит?

Первую часть статьи Бор начинает с классических выражений для частоты ν_0 обращения электрона по эллиптической орбите и для большой полуоси a . В современных обозначениях эти соотношения имеют вид:

$$\nu_0 = \sqrt[3]{2W}^{3/2} / \pi Ze^2 \sqrt{m}, \quad a = Ze^2 / 2W. \quad (3)$$

Здесь W — энергия вырывания электрона с данной орбиты.

Дальше Бор говорит о неприменимости классической электродинамики, которая привела бы к падению электрона на ядро. Затем он переходит к оценкам энергии и радиуса. Из планковской теории излучения следует, что количество энергии, испускаемой при каждом акте излучения, равно $h\nu$. Теперь допустим, говорит Бор, что электрон сначала попадает на высокую орбиту с малой частотой обращения; тогда он перейдет на окончательную орбиту, испустив n порций излучения. Допустим, что средняя испускаемая частота есть половина окончательной частоты обращения ν_0 . Тогда энергия вырывания равна $W = nh\nu_0/2$. И такая оценка приводит к точному результату! Это один из примеров поразительной интуиции Бора.

Подставляя из этой оценки ν_0 в выражение (3), получаем:

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

Если в этих выражениях изменять n , получается W и a , соответствующие возможным конфигурациям системы. Это и будут, по Бору, стационарные состояния, находясь на которых электрон не излучает. W максималь-

но, когда n равно единице. Это соответствует наиболее устойчивой орбите. Подставляя известные в то время экспериментальные значения для e , m и h , Бор получает оценки $a = 0,55 \cdot 10^{-8}$, $v_0 = 6,2 \cdot 10^{15}$, $W/e = 13$ эВ и заключает: «Мы видим, что эти величины того же порядка, что и линейные размеры атомов, оптические частоты и ионизационные потенциалы».

Из (4) Бор получает выражение для частоты излучения:

$$\nu = RZ^2 \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad R = 2\pi^2 me^4/h^3, \quad (5)$$

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

Бор обращает внимание на то, что из его теории нельзя получить другие серии, которые приписывали водороду, и что их естественно приписать гелию. Действительно, при $Z = 2$ выражение (5) дает серии, полученные Фаулером и Пикерингом.

Бор рассматривает большие n и приравнивает частоту излучения к частоте обращения, т. е., по существу, использует то, что позже стало называться принципом соответствия. Он подставляет в формулы $\nu = c_1 v_0$ и из принципа соответствия находит $c_1 = 1/2$. Таким образом, подтверждается оценка, сделанная им в начале статьи, а для подтверждения оценки надо допустить, во-первых, что «излучение испускается в виде порций $h\nu$ и, во-вторых, что частота излучения, испускаемого при переходе системы из одного состояния в соседнее, совпадает с частотой обращения электрона в области больших длин волн. Поскольку, — продолжает Бор, — все допущения, лежащие в основе излагаемой теории, имеют фундаментальный характер, мы вправе ожидать, если вообще весь наш метод рассмотрения справедлив, абсолютного, а не только приближенного совпадения наблюдаемого и вычисленного значений этой константы (Ридберга. — А. М.). Поэтому формула (5) может быть использована при обсуждении экспериментального определения констант e , m , h ».

На шестидесяти четырех страницах статьи Бор проанализировал с точки зрения своей теории все существ-

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

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

Если бы разница между водородом и гелием определялась только зарядом ядра, величина $K = \lambda(1/n_1^2 - 1/n_2^2)$ для водорода должна была бы быть в четыре раза больше, чем для гелия, между тем эксперимент дает 4,0016 — близко к четырем, но отклонение превышает ошибку эксперимента. Недостаточно точно известные константы e , m и h в это отношение не входят. Бор объясняет несовпадение разницей приведенных масс электрона в водороде и гелии. Используя исправленную таким образом формулу, он получает теоретическое значение 4,00163 в точном соответствии с экспериментом.

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

В этой же работе Бор предсказал целый ряд других линий гелия, которые должны несколько сместиться по сравнению с линиями Бальмера, а не совпадать с ними, как следовало из прежней точки зрения. Через год

Эванс обнаружил эти линии в заранее рассчитанных местах. Результаты Эванса в большой мере определили отношение Эйнштейна к теории Бора.

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

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

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

Теория Бора описывала все главнейшие свойства атомов, но смысл правил квантования оставался загадочным. Недаром Бор называл их постулатами — недоказанными предположениями. Их смысл стал ясен только после создания квантовой механики.

Работа Бора — одно из удивительных явлений в истории науки. Только гениальным озарением можно объяснить появление этой теории до того, как выяснились волновые свойства частиц. Именно по этому поводу

сказал Эйнштейн: «...высшая музыкальность в области теоретической мысли».

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА ДО 1923 ГОДА

Наиболее прямым подтверждением боровской теории атома были опыты Франка и Герца по возбуждению атома потоком электронов. Примерно к этому же времени (1913—1914 гг.) относятся работы Мозли — эксперименты по определению зависимости между частотой спектральных линий характеристического рентгеновского излучения и порядковым номером элемента, доказавшие равенство заряда ядра и порядкового номера. Эти эксперименты также подтвердили теорию Бора.

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

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

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

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

Методы нахождения допустимых орбит и соответствующих энергий основывались на «правилах квантования Бора—Зоммерфельда», которые обобщили боровское почти интуитивное квантование атома водорода на случай произвольных полей.

Для одномерного движения частицы с массой m в потенциале $V(x)$ правило квантования имеет вид:

$$\int_{q_1}^{q_2} p dq = (n + c_1)h, \quad (6)$$

где n — целое, положительное число, $0 < c_1 < 1$; E_n — энергия n -го уровня; $p = \sqrt{2m(E_n - V(q))}$; q_1 и q_2 — значения координат, при которых $p(q) = 0$. Физический смысл правил квантования мы обсудим в следующем разделе.

НОВАЯ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

Событие, которому суждено было объяснить смысл постулатов Бора, произошло в 1923 г. Французский ученый Луи де Бройль высказал гениальную догадку: если световые волны, по Эйнштейну, имеют свойства частиц, то, может быть, электрон имеет и волновые свойства, т. е. обладает таким же дуализмом, как и свет; частицы должны описываться волновым процессом с длиной волны λ , связанной с количеством движения p так же, как связана длина волны фотона с его импульсом $\lambda = h/p$.

Работа де Бройля о волнах материи была как бы продолжением работы Эйнштейна 1905 г. о световых квантах с той разницей, что в случае света волновые свойства были обнаружены раньше, чем корпускулярные.

Согласно де Бройлю, волновые свойства электрона можно описать волновой функцией, которая удовлетворяет простому «волновому уравнению». Решение этого уравнения есть плоская волна с длиной де Бройля.

В 1926 г. австрийский ученый Эрвин Шредингер обобщил догадку де Бройля на случай, когда электрон движется не в свободном пространстве, а во внешнем поле, например в кулоновском поле ядра. Он написал уравнение для «волновой функции Ψ », решение которого в отсутствие внешнего поля описывало волну де Бройля.

За несколько месяцев до Шредингера Вернер Гайзенберг предложил свой вариант квантовой теории. Он представил физические величины как совокупность всех возможных амплитуд перехода из одного состояния квантовой системы в другие. Сама вероятность перехода пропорциональна квадрату амплитуды, точнее, квадрату модуля амплитуды. Именно такие амплитуды перехода и наблюдаются на опыте. В таком представлении каждая величина имеет два индекса, определяющих начальное и конечное состояния системы. Эти величины называются «матрицами». Так, координате q соответствует матрица—совокупность матричных элементов q_{nm} , где n и m — два состояния системы. Гайзенберг получил замкнутые уравнения, из которых в принципе можно найти все наблюдаемые величины. Однако в своей первоначальной форме матричная механика Гайзенберга казалась неоправданно сложной по сравнению с волновой механикой Шредингера, о которой мы сейчас будем говорить.

Вот как выглядит уравнение Шредингера для одномерного движения в потенциале $V(x)$:

$$d^2\Psi/dx^2 + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \Psi = 0, \quad (7)$$

где m — масса частицы, $\hbar = h/2\pi$; Ψ — волновая функция.

Первое слагаемое — вторая производная Ψ по x . Если первая производная характеризует скорость изменения Ψ по x , то вторая производная дает скорость изменения этой скорости.

Решения этого уравнения для $V = 0$ очень легко найти. Их два: $\Psi_1 = a \sin kx$ и $\Psi_2 = b \cos kx$. Они и описывают волны де Бройля:

$$k = 2\pi/\lambda = \sqrt{2mE}/\hbar, \quad \lambda = h/\sqrt{2mE} = h/p.$$

Решения уравнения Шредингера для связанных состояний, когда вероятность найти частицу вдали от удерживающего ее поля мала, следует искать при условии, что волновая функция Ψ достаточно быстро стремится к нулю на больших расстояниях. При этом решение в кулоновском потенциале атома водорода существует не для всех энергий, а только для определенных дискретных значений, совпадающих с теми, которые получались из боровских правил квантования

Делается ясным смысл правил квантования Бора—Зоммерфельда — допустимые значения энергии соответствуют требованию, чтобы в области движения частицы уместилось целое число волн де Бройля. Действительно, из формулы (6), после деления на \hbar и использования соотношения де Бройля получаем:

$$\int_{q_1}^{q_2} \frac{dq}{\lambda(q)} = n + c_1.$$

Мы ввели длину волны, зависящую от координаты. В области, где $\lambda(q)$ медленно изменяется, интеграл $\int_0^l dq/\lambda(q)$ имеет смысл числа волн на длине l . Из-за того что вблизи точек q_1, q_2 $\lambda(q)$ делается большим, возникает поправка c_1 .

Уже в 1926 г. Шредингер показал полную эквивалентность волновой и матричной механик, которые объединились в квантовую механику.

В 1927 г. американские физики Дэвиссон и Джермер и, независимо от них, англичанин Томсон (сын знаменитого английского физика Дж. Дж. Томсона, впервые исследовавшего электрон) открыли дифракцию электронов на кристаллах. Таким образом подтвердилась не только волновая природа электрона, но и выражение для длины волны де Бройля.

Опыты по дифракции электронов тоже описываются уравнением Шредингера, если предположить, что интенсивность пучка электронов после рассеяния пропорциональна квадрату модуля волновой функции. Там, где волны, рассеянные атомами кристаллической решетки, складываются, получается максимальная интенсивность электронного пучка.

При уменьшении интенсивности пучка обнаруживается, что дифракционная картина не изменяется, даже если пролетает, скажем, один электрон в минуту. Значит, уже одному электрону следует приписать вероятность попасть в то или иное место фотопластинки, стоящей за кристаллом.

Сначала предполагали, что волновым свойствам частицы соответствует некое реальное физическое поле, подобное электромагнитному полю в световой волне. Но тогда уже один электрон давал бы в одном акте всю дифракционную картину, а он чернит только одно зер-

но фотопластинки. И это был не единственный довод против такого взгляда на природу волнового процесса.

Анализ мысленных опытов по интерференции волн де Бройля (пучок электронов, падая на экран с двумя отверстиями, должен дать на фотопластинке интерференционную картину) заставил Макса Борна еще в 1926 г., до открытия дифракции электронов, прийти к заключению, что волновая функция не физическое поле, а поле вероятности, квадрат ее модуля дает вероятность найти частицу в том или ином месте пространства. Интерференционная картина возникает в результате попадания в разные точки многих независимо движущихся электронов.

Вспомним, что теория волновых явлений света — интерференции и дифракции — была разработана задолго до появления уравнений Максвелла, т. е. до понимания электромагнитной природы света. Предполагалось только, что источник света испускает волны неизвестной природы, а интенсивность света пропорциональна квадрату той величины, которая колеблется. По современным представлениям колеблются во времени и пространстве электрические и магнитные поля, и интенсивность света пропорциональна сумме квадратов их напряженностей. Но почти все волновые проявления объясняются независимо от природы света.

Было естественно и для волн, связанных с частицами, считать, что есть некий волновой процесс, а интенсивность, в нашем случае — вероятность, пропорциональна квадрату модуля волновой функции.

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

Итак, волновая функция частицы описывает возможности исхода того или иного последующего наблюдения.

На этом закончился первый этап развития квантовой механики.

Даже после построения математического аппарата квантовой механики потребовались громадные усилия

для осмысления полученных результатов. Впервые возникли уравнения для поля вероятности, описывающие поведение не статистической системы, а отдельных частиц.

II. ЗАДАЧИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Решение уравнения Шредингера требует довольно сложной математики. Вместо этого можно ограничиться качественным рассмотрением. Попробуем найти приближенные решения уравнения Шредингера, максимально упрощая задачу.

Как мы видели, согласно уравнению Шредингера квантование, т. е. нахождение стационарных решений, приближенно сводится к тому, что в допустимой области движения частицы должно укладываться целое число волн.

КВАНТОВАНИЕ В ЯЩИКЕ

Проследим возникновение дискретности энергии сначала на самом простом примере. Предположим, что частица движется между непроницаемыми стенками, расположенными на расстоянии друг от друга. У каждой из стенок волновая функция должна обращаться в нуль, т. е. переходить в волновую функцию снаружи, которая равна нулю, поскольку за стенки частица не выходит. Чтобы получилось состояние с номером n , между стенками должно уложиться целое число полуволн: $2l/\lambda = n$. Так, в первом состоянии, когда между стенками укладывается половина длины волны, волновая функция равна нулю на стенках и имеет максимум посередине (рис. 2). Волновая функция стационарного, т. е. независящего от времени, состояния есть стоячая волна. Стоячую волну можно представить в виде двух волн, бегущих навстречу друг другу. Средний импульс стоячей волны равен нулю. Абсолютное же значение импульса такое же, как у соответствующей бегущей волны, и связано с ее длиной соотношением де Бройля: $p = h/\lambda = nh/2l$. Найдем энергию $E = p^2/2m$. Отсюда легко получить формулу $E_n = n^2 h^2 / 8ml^2$. Так в этом простом случае мы нашли уровни энергии.

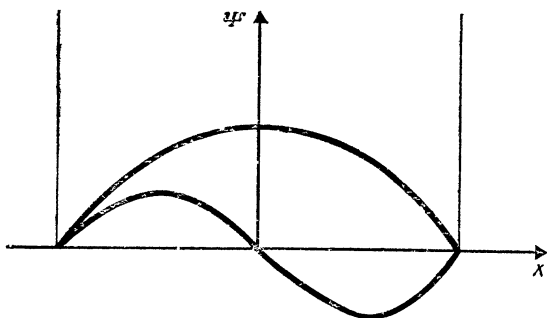


Рис. 2. Волновая функция для первых двух уровней в ящике

КВАНТОВЫЙ ОСЦИЛЛЯТОР

Общее для всех осцилляторов состоит в том, что энергия складывается из двух частей. Одно слагаемое пропорционально квадрату отклонения осциллятора от положения равновесия — это потенциальная энергия. Если q — величина отклонения от положения равновесия, то потенциальная энергия равна $U = \gamma q^2/2$. Коэффициент γ называется «жесткостью» осциллятора. Второе слагаемое — кинетическая энергия — может быть записано в виде $T = \beta \dot{q}^2/2$, где \dot{q} — скорость изменения величины q во времени. Величину β можно назвать «массой осциллятора». Как бы ни был конкретно устроен осциллятор, его угловая частота $\omega = 2\pi\nu$ и период колебаний T выражаются через жесткость γ и массу β : $\omega = \sqrt{\gamma/\beta}$, $T = 2\pi\sqrt{\beta/\gamma}$. В случае маятника роль жесткости играет ускорение силы тяжести g , а массы — длина маятника l . Таким образом можно рассмотреть сразу все осцилляторы независимо от их физической природы.

Для применения квантовой механики тоже несущественно, как реализован осциллятор: представляет ли он собой груз на пружинке или колебательный контур.

Обозначим через q «обобщенную» координату осциллятора — это может быть величина смещения груза из положения равновесия или заряд на обкладках конденсатора в случае колебательного контура. Энергия осциллятора равна сумме кинетической и потенциальной энергий: $E = \beta \dot{q}^2/2 + \gamma q^2/2$.

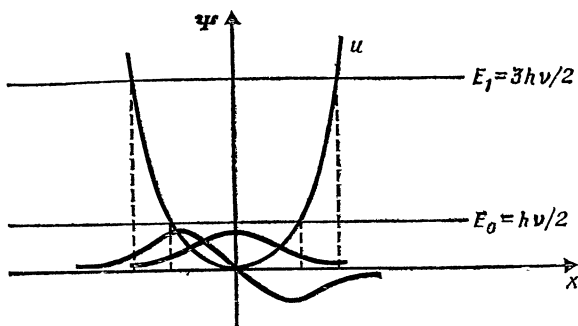


Рис. 3. Волновые функции для первых двух уровней осциллятора. В классически запрещенной области, где $E < U$, волновые функции резко падают

Можно представить, что осциллятор — это некая частица с массой β , которая колеблется на пружине с жесткостью γ . Введем длину волны λ волнового процесса, связанного с этой частицей. Импульс p есть произведение массы β на скорость \dot{q} . Поэтому согласно соотношению де Бройля $\lambda = h/\beta\dot{q}$. Поскольку частица движется в области от $-q$ до q , то для того, чтобы образовалась стоячая волна, на длине $2q$ должно укладываться целое число полувольт (с поправкой $c_1 \sim 1$, см. ф-лу (6)): $2q(\lambda/2) = n + c_1$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, $0 < c_1 < 1$.

Сначала найдем скорость \dot{q} . Для оценки возьмем $c_1 = 1/2$, тогда $\dot{q} = h(n + 1/2)/4\beta q$.

Наинизшее значение n равно нулю — на длине $2q$ укладывается половина длины волны — максимум по середине и нули на краях (рис. 3). Подставляя выражение для скорости в кинетическую энергию, найдем: $T_n = h^2(n + 1/2)^2/32\beta q^2$, а для полной энергии получим: $E_n(q) = h^2(n + 1/2)^2/32\beta q^2 + \gamma q^2/2$.

В осцилляторе среднее значение кинетической и потенциальной энергий равны. Определим q из этого равенства. Это же значение соответствует минимуму энергии $E_n(q)$. Получаем $q^2 = h(n + 1/2)/4\sqrt{\gamma\beta}$. Подставляя в выражение для энергии, найдем: $E_n = \frac{h}{4}\sqrt{\gamma/\beta}(n + 1/2) = \frac{\pi}{2}h\nu(n + 1/2)$; $n = 0, 1, 2, \dots$ Действительно, величина $\sqrt{\gamma/\beta} = 2\pi\nu$ представляет собой угловую частоту

колебаний классического осциллятора. При точном расчете для энергии получается выражение: $E = h\nu(n + \frac{1}{2})$, $n = 0, 1, 2...$

Таким образом, мы ошиблись только в численном множителе при n ($\pi/2$ вместо 1), а также в численном значении энергии наинизшего состояния, когда $n = 0$ ($\pi h\nu/4$ вместо $h\nu/2$). Все остальное получилось правильно! Теперь, когда результат получен, следует задуматься над тем, что мы использовали для его получения и что вытекает из полученных нами выражений для энергии осциллятора и для величины q^2 .

Мы применили к осциллятору, не интересуясь его устройством, принципы квантовой механики, установленные первоначально для электронов. Конечно, естественно ожидать, что общие принципы должны быть такими же и для других частиц с массой, отличающейся от массы электрона. Такое обобщение с большой точностью подтвердилось на опыте. Но почему эти же принципы приложимы и к колебательному контуру, где роль координаты играет заряд на обкладках конденсатора? Здесь мы использовали предположение, которое много раз применялось в теоретической физике XX века. Если две системы имеют энергии, одинаково зависящие от координат и скоростей, то все свойства таких систем совершенно одинаковы, какой бы смысл ни имели координаты и скорости.

Не было ни одного примера, где бы это предположение противоречило опыту. Поэтому мы вправе считать, что решили задачу о применении квантовой механики сразу для всех возможных осцилляторов.

Что означают полученные результаты? Как они переходят в формулы классической механики? Прежде всего мы получили, что энергия изменяется не непрерывно, а порциями величины $h\nu$, т. е. подтвердили предположение Планка, с которого началось зарождение квантовой физики.

Но мы получили еще одно важное свойство квантового осциллятора. Когда энергия минимальна, классический осциллятор находится в покое в положении равновесия, между тем как квантовый в наинизшем состоянии при $n = 0$ совершает колебания — «нулевые колебания». Кинетическая и потенциальная энергии этих колебаний $\sim h\nu$. Среднее значение координаты осциллятора равно нулю, а среднее значение квадрата координаты

наты дается приведенной выше формулой. Это замечательное свойство квантовых осцилляторов хорошо проверено на опыте и чрезвычайно важно для современной физики.

Если мы рассмотрим звуковые колебания твердого тела как набор квантовых осцилляторов, то получим, что при абсолютном нуле температуры атомы твердого тела не неподвижны, а совершают нулевые колебания. Это подтвердили опыты по рассеянию света при низких температурах. Если же теперь мы рассмотрим электромагнитные волны как набор осцилляторов в пустом пространстве, то придем к заключению, что в пустоте, даже когда в ней нет частиц или квантов, должны происходить «нулевые колебания» электромагнитного поля. И эти колебания были также обнаружены! Но об этом подробнее позже.

КВАНТОВАНИЕ В АТОМЕ

Дискретные значения энергии электрона в атоме получаются из того условия, что на длине орбиты, по которой движется электрон, должно укладываться целое число волн. Если радиус орбиты r , то n -му состоянию электрона соответствует условие $2\pi r = \lambda n$ ($n = 1, 2, \dots$), или $mv_n = \hbar n / 2\pi r$. Отсюда нетрудно найти кинетическую энергию в n -м состоянии:

$$T_n = mv_n^2 / 2 = \hbar^2 n^2 / 2mr^2, \quad \hbar = h / 2\pi.$$

Полная энергия электрона складывается из кинетической энергии и потенциальной энергии в поле ядра, которая отрицательна и равна $U = -Ze^2/r$ (Ze — заряд ядра, e — заряд электрона). Полная энергия электрона равна:

$$E_n(r) = \hbar^2 n^2 / 2mr^2 - Ze^2/r.$$

Предположим, что радиус орбиты r имеет фиксированное значение. Согласно квантовой механике радиусы орбит «разбросаны» в окрестности классически устойчивой орбиты. В качестве оценки радиуса можно взять значение r , которое соответствует минимуму энергии $E(r)$.

Чтобы найти минимум $E(r)$, поступим следующим образом. Перепишем выражение для $E(r)$ в таком виде: $E = Ax^2 - Bx$. Мы ввели такие обозначения: $x = 1/r$,

$A = \hbar^2 n^2 / 2$, $B = Ze^2$. Видно, что при $x_1 = 0$ и $x_2 = B/A$ значение $E = 0$. Внутри интервала $x_1 - x_2$ E отрицательно. Где-то внутри этого интервала лежит минимум E . Будем для оценки считать, что E соответствует значению x в середине интервала, т. е. $x = B/2A$. Соответственно $r = 1/x = 2A/B$, т. е. $r_n = \hbar^2 n^2 / mZe^2$ (при $n = 1$, $Z = 1$ это верная оценка радиуса атома водорода в наименьшем состоянии). Подставив r_n в выражение для $E_n(r)$, получим:

$$E_n = - \frac{Z^2 m e^4}{\hbar^2} \cdot \frac{1}{2n^2}.$$

Получилось то же выражение, которое следует из точного решения уравнения Шредингера!

В действительности электрон может находиться с разной вероятностью на любом расстоянии от ядра. Наше упрощение состояло в предположении, что это расстояние определенное, равное r , и находится из условия минимальности энергии. Разумеется, мы действовали грубо. Поэтому нельзя доверять числовому множителю впереди этой формулы, хотя он случайно получился правильным. Но всему остальному можно доверять! И множителю $Z^2 m e^4 / \hbar^2$, и что особенно важно, зависимости от «квантового числа» n .

То, что мы получили в этом случае и в случае осциллятора, и есть качественное решение, когда результат получается с точностью до неизвестного числового множителя, но характер зависимости от параметров задачи передается точно. Качественное решение чрезвычайно облегчает получение точного решения, поскольку выясняются главные черты явления. Более того, если есть качественное решение, а точного не удастся получить аналитически, его можно без особых потерь в понимании задачи найти с помощью вычислительных машин.

КВАНТОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ

Как мы сейчас увидим, применение квантовой механики к вращающемуся телу приводит к тому, что момент количества движения может принимать не любые, как в классической механике, а только кратные величине \hbar значения. Это относится и к полному моменту, и к его проекции на какую-либо ось. Поэтому вращающееся тело может наклоняться не под всеми углами, а только под некоторыми.

Для больших тел эта скачкообразность незаметна из-за малости \hbar . Иное дело — в атомах и молекулах, где момент невелик. Это удивительное явление, которое было названо «пространственным квантованием», обнаружили экспериментально еще до создания квантовой механики. В 1922 г. Отто Штерн и Вальтер Герлах пропускали пучок атомов через неоднородное магнитное поле. Атом представляет собой магнитик с магнитным моментом, пропорциональным угловому моменту. Поэтому атомы с разными проекциями момента на направление магнитного поля по-разному отклоняются. Допустим, момент атома равен единице. Тогда возможны три проекции 1, 0, -1 , и после отклонения пучок разобьется на три пучка в соответствии с этими значениями проекции момента. Так и получилось в опыте Штерна — Герлаха.

Получим пространственное квантование из простых рассуждений. Спутник, огибающий Землю, совершает три независимых движения — по меридиану, по параллели и по направлению к центру Земли. Точно так же у частицы в поле, зависящем не от углов, а только от расстояния до центра (например, кулоновское поле ядра), есть три независимых движения. Все их можно квантовать независимо.

Рассмотрим движение по параллели, ось Z направим от Южного полюса к Северному. Пусть расстояние до оси вращения ρ . Тогда $\lambda = h/mv = h\rho/M_z$. Здесь M_z — момент количества движения вокруг оси Z , или, что одно и то же, проекция полного момента на ось Z . На длине $2\pi\rho$ должно уложиться целое число волн, иначе не получится стоячей волны. Совершив полный оборот и придя в ту же точку на параллели, мы должны иметь то же значение волновой функции, что и до оборота. Таким образом, $2\pi\rho = n\lambda$, где n — целое число. Из выражения для λ получаем: $M_z = n\hbar$. Проекция момента есть целое число, умноженное на \hbar . Максимальное возможное значение проекции получается, когда полное вращение происходит по оси Z . Тогда $M_z = M = n_m\hbar$. Мы получили, что и полный момент квантовой системы есть целое число, умноженное на \hbar .

Будем измерять момент и его проекцию в единицах \hbar . Мы видим, что проекция момента принимает все возможные целые значения от $-M/\hbar$ до M/\hbar . Для момента $M/\hbar = 1$, $M_z/\hbar = 1, 0, -1$.

Есть частицы, которые благодаря внутреннему движению имеют полуцелый спин (момент, деленный на \hbar), например, спин электрона и протона равен $1/2$. Не удивительно, что для описания внутреннего движения частиц наша простая схема не годится. Полный момент электрона в атоме водорода и проекция принимают не целые значения, а полуцелые. Так, для основного состояния спин электрона в атоме водорода равен $1/2$, и проекции — $1/2$, $-1/2$.

РАССЕЯНИЕ ЧАСТИЦ

Задачи квантовой механики, разумеется, не исчерпываются «квантованием», т. е. нахождением стационарных состояний и соответствующих им энергий.

Как уже говорилось, первое подтверждение волновой природы частиц было получено при рассеянии электронов на кристаллической решетке. Кристалл играл такую же роль, что и дифракционная решетка в случае рассеяния света.

Не менее важную информацию о свойствах частиц физики получают, изучая рассеяние в газе, где в каждом акте рассеяния участвуют только две системы — падающая и рассеивающая.

Почти все свойства атомов, ядер и элементарных частиц были найдены при исследовании их рассеяния друг на друге.

Рассеяние определяется так называемым поперечным сечением, отношением числа рассеянных в единицу времени частиц к плотности потока падающих (число падающих частиц в единицу времени через единицу площади).

Рассмотрим рассеяние частицы на непроницаемом шарике радиуса a . Когда длина волны частицы достаточно мала ($\lambda \ll a$), можно говорить о траектории падающих частиц. Те частицы, траектории которых проходят на расстоянии от центра шарика, больше a , не рассеиваются. Число рассеянных за какое-то время частиц равняется числу падающих за то же время на площадку радиуса a . Оно равно плотности потока, помноженной на πa^2 . Согласно определению сечения это число нужно разделить на плотность потока. Получаем, что поперечное сечение рассеяния равно $\sigma = \pi a^2$, что и подтверждает разумность определения. Нетрудно убедить-

ся, что рассеянные частицы распределены по углам сферически симметрично («сферически симметричное рассеяние»).

Как влияет волновая природа частиц на сечение рассеяния? Прежде всего на рассеивающей системе происходит дифракция волны де Бройля, описывающей частицу, подобно тому как свет дифрагирует на непроницаемом диске.

К поперечному сечению классического рассеяния $\sigma_{\text{кл}} = \pi a^2$ добавляется такое же по величине дифракционное рассеяние. Но при этом в отличие от классического случая направление рассеянных частиц составляет при малых λ малые углы с направлением падающих частиц.

Практически все рассеянные частицы рассеиваются внутрь угла дифракции $\Theta = \lambda/a$.

Для того чтобы наблюдать рассеяние на малый угол, нужно иметь установку, отделяющую рассеянные частицы от падающих. Чем меньше угол рассеяния, тем труднее это сделать, поэтому при очень малых значениях $\Theta = \lambda/a$ дифракционное рассеяние делается практически ненаблюдаемым и остается только классическое рассеяние.

Еще более разительно влияние квантовых эффектов при так называемом резонансном рассеянии.

Пусть на сферической потенциальной яме радиуса a рассеиваются частицы малой энергии с $\lambda \gg a$. Когда частица находится внутри ямы, длина ее волны $\lambda_1 \ll \lambda$ и определяется глубиной ямы. Если выполнено условие $2a/\lambda_1 = n + 1/2$, напоминающее условия квантования в осцилляторе, то говорят, что в яме есть резонансный уровень при малой энергии. В этом случае сечение рассеяния превышает геометрические размеры рассеивателя и равняется $\sigma = \lambda^2/\pi$. Аналогичное явление происходит и при «резонансном» рассеянии частиц сложной системой, например при рассеянии и поглощении нейтронов ядрами. Когда энергия частицы приближается к «резонансному» значению, соответствующему уровню системы «рассеиватель + частица», сечение рассеяния или поглощения может во много раз превысить геометрическую площадь рассеивающей системы, но не превышая величины порядка λ^2 .

Поясним, почему возникает такое ограничение. Волновые свойства приводят к тому, что частицу нельзя

рассматривать как точку. Ее можно приближенно рассматривать как шарик с размерами порядка длины волны частицы. В том случае, когда длина волны больше, чем геометрические размеры рассеивателя, сечение может оказаться больше геометрического, но никак не может заметно превосходить длину волны, т. е. радиус шарика, которым мы заменили частицу.

Итак, в случае малой длины волны сечение определяется геометрическими размерами рассеивающихся систем, а в случае большой длины волны — по порядку величины не может превосходить квадрат длины волны.

ПРОХОЖДЕНИЕ ЧЕРЕЗ БАРЬЕР

Вскоре после того как Резерфорд выдвинул планетарную модель атома, физики обнаружили важный парадокс. Анализируя опыты по рассеянию α -частиц на большие углы, Резерфорд пришел к заключению, что радиус атомных ядер не превышает 10^{-12} см (напомним, что радиус электронной орбиты в атоме водорода $5 \cdot 10^{-9}$ см).

Для тяжелых ядер это соответствует потенциалу отталкивания для α -частиц $V = 2Ze^2/R \cong 28$ МэВ (при $Z = 100$, $R = 10^{-12}$ см). Между тем из тяжелых ядер вылетают α -частицы с гораздо меньшей энергией (порядка нескольких МэВ) (рис. 4). Как это возможно? Полная энергия α -частицы сохраняется при движении и складывается из потенциальной и кинетической энергий: $E = V(r) + T$. В области, где $V > E$, кинетическая энергия отрицательна, что совершенно бессмысленно с точки зрения классической механики. Разрешение этого парадокса стало возможным только после создания квантовой механики, когда стало ясно, что такие понятия, как траектория частицы, имеют ограниченный смысл. Уже в 1927 г. советский физик Георгий Гамов построил квантовомеханическую теорию α -распада.

Чтобы понять это явление, мы, следуя нашему правилу максимального упрощения, рассмотрим прохождение частицы через барьер, имеющий вид прямоугольного потенциала (рис. 5). Во всех трех областях — слева, справа и внутри барьера — потенциала решение уравнения Шредингера легко найти. Нужно «сшить» все три решения, потребовав, чтобы волновая функция и ее производная были непрерывны на двух границах, где по-

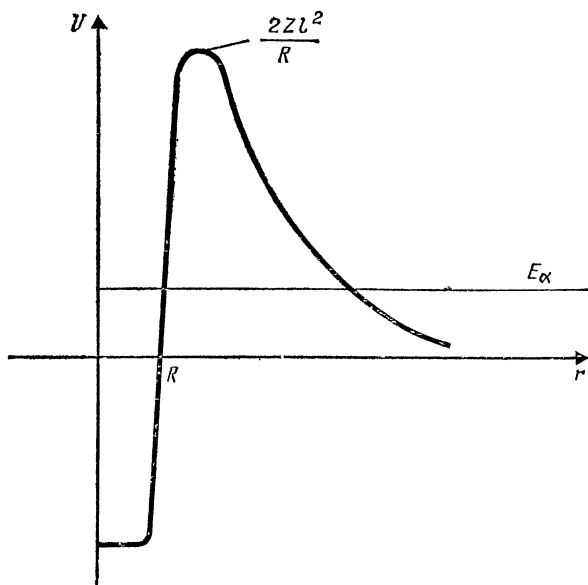


Рис. 4. Вид потенциального барьера для α -частиц. R — радиус ядра, Высота барьера $\approx 2Ze^2/R > E_\alpha$

тенциал скачкообразно изменяется. Мы поступим еще проще — определим только характер поведения $\Psi(x)$ во всех областях. Слева от барьера $\Psi_I(x) = a \sin(kx + \varphi)$, где $k = \sqrt{2m(E-V)}$. Формально такого же типа решение будет и в средней области. Но там $V > E$ и, следовательно, под корнем стоит отрицательное число, и k есть мнимое число. Это означает, что в области, где $V > E$, решение следует искать в виде $\Psi(x) = b_1 \exp(-\kappa x) + b_2 \exp(\kappa x)$, где $\kappa = \sqrt{2m(V-E)}$.

И наконец, в правой области решение имеет такой же вид, как и в левой, но с другой амплитудой и фазой: $\Psi_{III} = C \sin(kx + \kappa)$.

Результат «сшивки» этих трех решений показан на рис. 5. Амплитуда волновой функции прошедшей волны меньше, чем падающей: $C = e^{-\kappa d} a$, где d — ширина барьера. Качественно наши результаты сохраняются и для потенциала, изображенного на рис. 4. В областях, где $E > V$ имеются решения синусоидального типа, а в области, где $V > E$ — экспоненциально падающее реше-

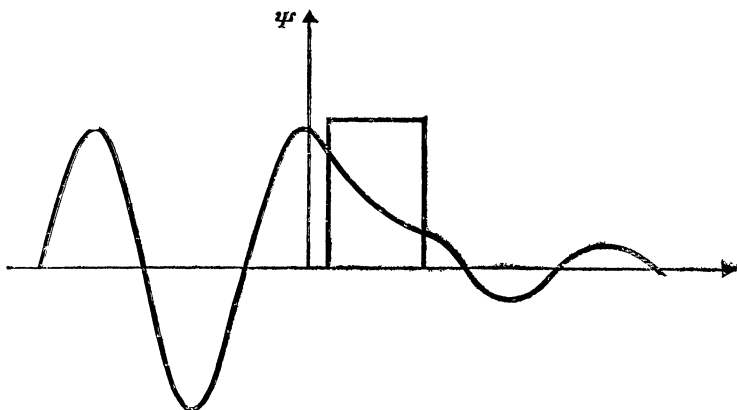


Рис. 5. Прохождение через потенциальный барьер

ние (в этой области есть еще растущее решение, но с экспоненциально малым коэффициентом, которое не существенно изменяет результат).

Это означает, что нельзя получить независящее от времени решение, которое описывало бы α -частицу, сидящую целиком внутри ядра.

При подходе, который мы рассмотрели, имеется стационарный поток α -частиц из внутренней области ядра наружу. Но возможна и другая, более физическая постановка вопроса, которую мы за недостатком места только наметим.

Допустим, в результате какой-либо ядерной реакции образовалось ядро, из которого со временем вылетит частица. Это означает, что в начальный момент α -частица описывается волновой функцией, оборванной на краю ядра. Ведь в начальный момент вероятность найти ее вне ядра равна нулю. Такое состояние α -частицы не отвечает какой-либо одной определенной энергии, и соответствующая волновая функция есть сумма («суперпозиция») волновых функций разных энергетических состояний. С течением времени волновая функция расплывается и, как показывает расчет, при таком подходе получается тот же результат для вероятности распада, что и при стационарном рассмотрении.

III. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

ФИЗИКА И ФИЛОСОФИЯ

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

Поясню, что, как мне кажется, следует понимать под словами «философия физики» или, еще уже, — «философия квантовой физики». После этого станет понятна уникальная роль Нильса Бора в становлении квантовой теории.

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

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

Идея о том, что в науке не должно быть понятий, которые не могут быть сформулированы на языке реального или мысленного эксперимента, — принцип наблюдаемости — заставила Эйнштейна подвергнуть со-

мнению интуитивное понятие одновременности и ввести определение одновременности, проверяемое на опыте.

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

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

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

С позиции Лоренца — Пуанкаре сокращение Лоренца выглядит удивительным событием, которое почему-то должно выполняться для всех видов сил. Между тем у Эйнштейна оно является прямым следствием его двух постулатов: требования неизменности законов природы при изменении инерциальной системы и постоянства скорости света.

Идея произвольных соглашений вряд ли. безоговорочно применима в опытных науках. Системы Птолемея и Коперника логически равноправны, но без «согла-

шения» Коперника не были бы найдены законы Кеплера и закон тяготения. Можно было бы построить новую механику и на «соглашении» Лоренца — Пуанкаре. Но эта механика была бы несравненно сложнее теории относительности.

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

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

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

Эти утверждения трудно принять физику математического происхождения, который рассматривает теоретическую физику как раздел прикладной математики. Он удивляется: «Почему вы приписываете главную заслугу в создании теории относительности Эйнштейну, тогда как преобразования Лоренца были получены раньше?» или «Почему вы приписываете главную роль в по-

нимании квантовой механики Бору, тогда как основное уравнение этой теории получил Шредингер (или в матричной форме — Гайзенберг)?»

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

Бор сказал о теории элементарных частиц Гайзенберга: «Эта теория недостаточно безумна, чтобы быть правильной». Фраза Бора часто цитируется и приносит немало вреда дилетантам, принимающим нелепость теории за достаточное условие ее ценности. Может быть, более естественно предположить, что фраза Бора была продиктована его вежливостью. Более точное утверждение — эта теория не может быть правильной, так как она недостаточно красива.

Особенность «прикладной философии» состоит в том, что после решения задачи философская проблема исчезает. Так было и с парадоксом волн—корпускул. После создания квантовой электродинамики, когда стало ясно, что квант света — это порция возбуждения электромагнитной волны, проблема исчезла. Она исчезает всякий раз, когда мы можем ответить на любой разумный вопрос, поставленный экспериментом. В этом одна из причин некоторого пренебрежения философской стороной физики, особенно распространенного среди молодых физиков-теоретиков. Другая причина в том, что можно с успехом заниматься теоретической физикой без всякой философии, ограничиваясь разработкой следствий из уже существующих теорий. Такие работы привлекают своей «достоверностью» и «надежностью» и граничат с прикладной математикой. В них не содержится существенных предположений, требующих проверки, но именно поэтому сами по себе такие работы не приводят к появлению новых теорий.

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

ны его уникальной роли в становлении квантовой теории.

НИЛЬС БОР

Когда речь идет о художнике, мы обычно стараемся понять, в какой манере он пишет, к какому течению его причислить. Этот же вопрос можно отнести и к ученому. Некоторые физики-теоретики работают в стиле Эйнштейна, в манере Планка, другие — в стиле Ландау, Фейнмана или в совершенно ином — Гелл-Манна, но, пожалуй ни про кого нельзя сказать, что он работает в стиле Бора. А вместе с тем Бор повлиял на формирование нескольких поколений физиков. В 1922 г. в письме к Арнольду Зоммерфельду он написал странные слова: «...В последнее время я, как ученый, часто чувствовал себя очень одиноким...» Странные — потому что их сказал человек, окруженный плеядой талантливых физиков, благоговевших перед ним: Паули, Гайзенберг, Шредингер, Крамерс, Ландау, Пайерлс, Клейн, Дирак... Но неповторимость стиля Бора оказывалась причиной его научного одиночества. Где же истоки необычного физического и философского мышления Бора, его неповторимого дара глубокого философского осмысления физических явлений?

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

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

правленности. По мнению Дж. Холтона, Бор, размышляя об этом, как бы выполнял сыновний долг.

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

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

В молодые годы Бора взволновала поэтическая про-

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

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

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

В 1911 г. Бор уехал в Кембридж для работы в Кавендишской лаборатории у Дж. Дж. Томсона. В 1906 г. Томсон получил Нобелевскую премию за «теоретические и экспериментальные исследования электропроводности газов», хотя, возможно, ее следовало бы присудить за открытие электрона (1897 г.).

Томсон предложил модель атома, в которой электроны движутся в положительно заряженном облаке. Его окружение безоговорочно принимало эту модель.

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

В то время Резерфорд был в расцвете славы и таланта. За исследования по радиоактивному распаду и химии радиоактивных веществ он в 1908 г. получил Нобелевскую премию по химии, а в 1911 г. предложил планетарную модель атома. Как мы уже говорили, Бор сразу же сделался сторонником этой модели. По при-

глашению Резерфорда он в марте 1912 г. уезжает в Манчестер.

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

Таковы были события личной и научной жизни Бора к началу работы над статьей «О строении атомов и молекул».

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

Наверное, нужно более точно определить понятие «философ» применительно к Нильсу Бору. Его отношение к профессиональным философам всегда было скептическим. Бор всегда использовал любую возможность для бесед с датскими и зарубежными философами, но эти беседы, как правило, его не удовлетворяли. Бор пришел к заключению, что философией физики должны заниматься профессиональные физики. И такая конкретная философия совершенно необходима для развития науки. Именно она создает почву, на которой возникают неожиданные вспышки интуиции.

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

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

Бор не любил работать один. Он никогда ничего не писал сам, а диктовал свои мысли либо Маргарет, либо своему секретарю Бетти Шульц, либо ученикам — Паули, Крамерсу, Розенфельду... Ему непременно нужен был слушатель для того, чтобы мысль приобрела законченную форму. Крамерс цитирует Бора: «Мой метод работы заключается в том, что я стараюсь высказать то, чего я, в сущности, высказать не могу, ибо просто не понимаю этого!»

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

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

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

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

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

СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ

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

Гайзенберг, анализируя возможности измерения координаты и импульса электрона, пришел к заключению, что условия, благоприятные для измерения положения, затрудняют нахождение импульса, и наоборот, — в этом смысле понятия координаты и импульса дополнительны друг другу. Для доказательства он пользовался мысленными экспериментами. Вот краткая схема одного из них.

Для того чтобы определить положение электрона, нужно осветить его светом и посмотреть в «микроскоп». Такой способ определения координаты дает неопределенность Δq порядка длины волны λ использованного света: $\Delta q \sim \lambda$.

Для уточнения положения электрона надо брать возможно меньшую длину волны света. Но это палка о двух концах. При взаимодействии с электроном свет передает ему импульс. Чтобы уменьшить передаваемый импульс, можно ослабить интенсивность света так, чтобы с электроном взаимодействовал один фотон. Минимальный передаваемый электрону импульс будет порядка импульса одного кванта. Этот импульс связан с длиной волны соотношением $p_\gamma = h/\lambda$, поэтому неопределенность импульса электрона: $\Delta p > h/\lambda$. Умножая на λ и подставляя Δq вместо λ , получаем: $\Delta q \Delta p > h$. Это и есть соотношение неопределенностей Гайзенберга.

Проделав множество подобных мысленных экспериментов, нельзя не прийти к заключению, что здесь речь идет о принципиальном ограничении, которое природа

накладывает на понятия координаты и импульса частицы. Этого ограничения не знала классическая физика, оно не вносит изменения в описания макрообъектов из-за очень малой величины постоянной Планка.

Соотношение, аналогичное соотношению неопределенностей Гайзенберга, существует, как показал Бор, и для произведения неопределенности энергии ΔE и неопределенности времени взаимодействия Δt объекта с измерительным прибором: $\Delta E \Delta t > h$. Для пояснения этого соотношения сделаем еще один мысленный эксперимент.

Допустим, в экране, на который падает частица, имеется отверстие, достаточно широкое, чтобы пренебречь неопределенностью поперечного импульса, возникающего при прохождении частицы через экран. Пусть отверстие закрывается заслонкой на определенное время Δt . Поскольку момент взаимодействия частицы с краями отверстия имеет неопределенность Δt , то неопределенность координаты частицы в продольном направлении есть $\Delta q = v \Delta t$, где v — скорость частицы. Предполагается, что при прохождении отверстия скорость мало изменилась. Согласно соотношению неопределенностей Гайзенберга неопределенность импульса частицы $\Delta p > h / \Delta q = h / v \Delta t$. Но неопределенность импульса создает неопределенность энергии $\Delta E = v \Delta p = h / \Delta t$, а это и есть соотношение неопределенностей Бора.

До сих пор говорилось о неопределенностях, которые возникают в акте измерения. В этих случаях уравнение Шредингера неприменимо для описания частицы хотя бы потому, что она не изолирована, а взаимодействует с другой системой, играющей роль измерительного прибора.

Есть соотношение неопределенностей, имеющее другой физический смысл. Пусть частица находится в определенном состоянии, описываемом волновой функцией, которая удовлетворяет уравнению Шредингера. В этом состоянии интервалы возможных значений дополнительных величин (например, средние квадратичные отклонения импульса и координаты частицы от их средних значений) будут удовлетворять соотношению неопределенностей.

Так, в основном состоянии атома водорода волновая функция дает интервал возможных значений координаты электрона, который связан с интервалом возможных

значений импульса соотношением: $\Delta p \Delta q > h$. Отсюда можно оценить радиус атома a , характеризующий интервал возможных значений координаты $\Delta q \sim 2\pi a$. В основном состоянии потенциальная энергия электрона e^2/a должна быть примерно равна кинетической энергии $p^2/2m$, где p по порядку величины равно возможному значению импульса $p \sim h/2\pi a = \hbar/a$. Приравнивая эти две энергии, получаем оценку для радиуса атома $a \sim \hbar^2/me^2$ и для энергии ионизации $I \sim me^4/\hbar^2$.

Атом в возбужденном состоянии имеет неопределенную энергию. Эта неопределенность объясняется возможностью перехода на нижние уровни, сопровождающегося испусканием кванта. Неопределенность энергии связана соотношением Бора со временем жизни атома τ по отношению к испусканию света: $\Delta E \tau > h$.

Соотношения неопределенностей — частный случай и конкретное выражение общего принципа дополнительности, сформулированного Бором в 1927 г. Именно этот принцип позволяет примирить, казалось бы, непримиримое: ведь электрон проявляет себя в разных экспериментах то как частица, то как волна. Квантовая механика осуществляет синтез этих понятий и дает возможность предсказывать исход любого опыта, в котором проявляются как корпускулярные, так и волновые свойства частиц.

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

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

ность, отрицая физико-химическую сторону биологических процессов.

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

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

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

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

ОСОБЕННОСТИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

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

Предсказания квантовой механики не дают однозначного ответа, а лишь вероятность того или иного результата. Как бы точно мы ни определяли состояние частицы до ее падения на экран со щелью, нельзя предска-

зять, в какой именно точке фотопластинки, помещенной за экраном, она окажется.

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

В квантовой механике задать «координаты и скорости всех частиц» невозможно. Самое большее, что можно сделать, — задать в начальный момент волновую функцию. Волновая функция есть максимально полное допустимое описание состояния частицы. Она заменяет классическое состояние, которое задается координатами и скоростями. Квантовая механика позволяет однозначно найти волновую функцию в любой более поздний момент. Причинность в лапласовом смысле нарушается, но в более точном квантовомеханическом понимании она соблюдается. Из максимально полно определенного начального состояния однозначно следует единственно возможное конечное состояние. Изменился только смысл слова «состояние».

Главное открытие квантовой механики — вероятностный характер законов микромира.

Вероятностное описание физических явлений (статистическая физика) до квантовой механики возникало в сложных системах, где малое изменение начальных условий приводит за достаточно большое время к сильному изменению состояния. Эти системы описываются строго однозначными уравнениями классической механики, и вероятность появляется при усреднении по интервалу начальных состояний.

В противоположность этому согласно квантовой механике вероятностное описание справедливо как для

сложных, так и для самых простых систем и не требует никакого дополнительного усреднения начальных условий.

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

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

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

Волновая функция — не физическое поле, а поле информации. Из этого вытекают многие особенности квантовой механики. Прежде всего у частицы не обязательно имеется волновая функция. Чтобы приписать системе волновую функцию, необходимо отобрать состояние, в котором каждая из полного набора одновременно измеримых величин, определяющих поведение системы,

имеет определенное значение. Это условно формулируется так: над системой должен быть проведен максимально полный опыт. Если же опыт не полон, теория позволяет сделать менее определенные предсказания.

Соотношение неопределенностей справедливо и в том случае, когда у частицы нет волновой функции. Разумеется, поскольку уравнение Шредингера не противоречит этому соотношению, средние квадратичные отклонения дополнительных величин, вычисленные с помощью волновой функции, ему тоже подчиняются. Но физический смысл этого результата совершенно иной, чем у соотношения, полученного Гайзенбергом. Если соотношение Гайзенберга отражает дополненность классических понятий и относится к любому эксперименту, полному или неполному, то соотношение средних квадратичных отклонений есть математическое следствие уравнения Шредингера и, следовательно, предполагает существование волновой функции.

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

Пусть между пучком электронов и фотопластинкой имеется экран с двумя отверстиями. Закроем заслонкой одно из отверстий. Тогда электрон идет обязательно через другое, и на его волновую функцию заслонка не влияет. Обозначим эту функцию Ψ_1 . Перенесем заслонку на другое отверстие и обозначим новую волновую функцию Ψ_2 . Если оба отверстия открыты, волновая функция $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$. Вероятность найти электрон в какой-либо точке фотопластинки будет: $P = |\Psi|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$. Если в какой-либо точке Ψ_1 и Ψ_2 равны, мы получим вероятность $P = 4|\Psi_1|^2 = 4P_1$, а если они отличаются по знаку, то $P = 0$ — в эти места электроны не попадают. Если отверстия будут открыты попеременно, будут складываться вероятности, а не волновые функции. Соответствующая вероятность будет: $P' = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 = P_1 + P_2$. Интерференция исчезнет, величины P_1 и P_2 — положительные и друг друга не погашают. Таким образом, попытка уточнить траекторию частицы, отбирая случаи, когда она проходит через одно отверстие, уничтожает интерференцию. Так проявляется дополненность классического пространственно-временного описания частицы и ее волновых свойств.

У волновой функции есть еще одна особенность: пос-

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

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

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

СПОР БОРА С ЭЙНШТЕЙНОМ

Бор и Эйнштейн впервые встретились в Берлине весной 1920 г. Эйнштейну был 41 год, Бору — 34. Они давно знали и ценили друг друга. Личная встреча произвела на обоих огромное впечатление. Вскоре после знакомства Эйнштейн писал Бору: «Не часто в моей жизни человеческая личность доставляла мне такую радость самым фактом своего существования...» В это же время он пишет Эренфесту: «Бор был здесь, и, так же как и ты, я совершенно влюблен в него. Он похож на чрезвычайно чувствительного ребенка, перемещающегося в этом мире в состоянии некоего транс...» Бор, в свою очередь, писал Эйнштейну: «Встретить Вас и говорить с Вами было одним из сильнейших переживаний в моей жизни...»

Ирония судьбы состояла в том, что Бор — будущий создатель принципа дополнительности — до 1925 г. старался в своих работах сохранить классическую электродинамику, не понимая, что открытый Эйнштейном в 1905 г. дуализм волн-частиц был первым примером дополнительности. Позже, когда почти все физики приня-

ли вероятностную интерпретацию волновой функции, Эйнштейн отнесся к этому толкованию отрицательно, хотя сам в работе 1916 г. впервые ввел вероятности переходов...

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

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

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

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

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

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

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

Спор Бора с Эйнштейном был, по существу, спором двух философий, двух теорий познания — ясного взгляда старой физики, возвращенного на классической механике и электродинамике с их однозначной детерминированностью, и более гибкой философии, вобравшей в се-

бя новые факты квантовой физики XX в. и вооруженной принципом дополнительности.

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

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

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

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

Итак, Белл показал, при каких экспериментах можно увидеть различие между предсказаниями квантовой механики и теории скрытых переменных. Такой опыт был выполнен в 1972 г. Стюартом Фридманом и Джоном Клаузером. Они наблюдали свет, испускаемый возбужденными атомами кальция. В условиях их экспери-

мента атом кальция испускал последовательно два кванта видимого света, которые можно было отличить с помощью обычных цветowych фильтров. Каждый квант попадал в свой счетчик, проходя через поляриметр, который отбирал определенное направление поляризации. Изучалось число совпадений счетчиков как функция угла между направлениями поляризации двух квантов. Теория скрытых переменных предсказывала провалы на кривой, изображающей эту зависимость. На опыте не только не оказалось никаких провалов, но вся экспериментальная кривая в точности совпала с теоретической кривой, полученной из квантовой механики. Позже были поставлены другие более точные опыты, которые тоже согласовались с квантовой механикой.

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

IV. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

СВОЙСТВА ПУСТОТЫ

В конце 20-х годов квантовая механика была обобщена на частицы, движущиеся со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Тогда же квантовую механику применили к электромагнитному полю в вакууме. Стало выясняться, что квантование полей в вакууме — не только электромагнитного поля, но и полей, описывающих электроны и их античастицы — позитроны, — одна из важнейших задач квантовой физики.

Прежде чем обсуждать эти задачи, вспомним, как изменялись наши представления о пустоте — вакууме.

Что находится в межзвездном пространстве, где почти нет вещества?

Развитие физики последних десятилетий показало, что наше физическое пространство — вакуум — не просто геометрический объект, не пространство, в котором ничего нет, а сложная система, обладающая интереснейшими свойствами, совершенно не похожими на свой-

ства твердых сред, жидкостей или газов; его изучение касается самых глубоких понятий, таких, как причинность, связь геометрии с материей, симметрии пространства и времени, связь симметрии с законами сохранения...

В XIX веке для объяснения передачи воздействия в пустоте была придумана специальная среда — эфир, заполняющий все пространство между телами. Воздействие передается за счет того, что вокруг заряженных и намагниченных тел эфир деформируется, и в этом причина силы, действующей на другое заряженное или намагниченное тело. Свет распространяется в эфире как звук в твердом теле. Деформация эфира передается от точки к точке.

Вплоть до начала XX века физики пытались строить эфир по образу и подобию твердых и жидких тел, а его нужно было изучать самого по себе. Это — среда особого рода. Из-за неверного представления о природе пустоты возникли интереснейшие парадоксы, разрешение которых привело к созданию новых физических теорий.

Например, возник вопрос: увлекается ли эфир при движении тел? Некоторые эксперименты показывали частичное увлечение эфира, другие — полное, третьи же показывали, что эфир вовсе не увлекается. Знаменитый опыт Майкельсона, поставленный в 1887 г., с колоссальной точностью показал, что скорость света одинакова, если ее измерять вдоль и поперек движения Земли. Движение источника не влияет на скорость распространения света; если свет распространяется в эфире, то отсюда следует, что эфир полностью увлекается Землей. Однако измерение скорости света в текущей воде (опыт Физо, 1853 г.) можно было объяснить только частичным увлечением эфира движением среды.

Противоречие между опытом Физо и опытом Майкельсона было снято новой формулой сложения скоростей, вытекавшей из теории относительности. Результаты опыта Физо объяснились без всякого предположения о свойствах эфира: скорость движения воды в этом опыте складывается со скоростью света не арифметически, а по более сложной формуле. Отпала необходимость во введении самого понятия эфира, возник новый объект — вакуум, — свободный от противоречий. Эфир умер.

Но в науке новое, как правило, не отменяет старо-

го, старые и новые идеи переплетаются и проникают друг в друга. Даже коренная научная революция не отменяет, а только пересматривает, переосмысливает прежнее, устанавливает границы применимости найденных ранее соотношений. Судьба эфира — убедительное подтверждение этому.

В начале века казалось, что все свойства пустоты исчерпываются гравитационными и электромагнитными воздействиями. Изучение атомных ядер показало, что, кроме сил тяготения и электромагнетизма, есть еще другие силы, удерживающие нейтроны и протоны в ядре, — ядерные. Их тоже с точки зрения близкодействия следует рассматривать как напряженное состояние вакуума. Прибавилось еще одно свойство вакуума.

Но по-настоящему богатство вакуума стало выясняться после применения квантовой механики к электромагнитному полю и другим полям, описывающим пары частиц: электрон—позитрон, протон—антипротон и так далее. После создания ускорителей заряженных частиц выяснилось, что из пустоты при столкновениях нуклонов может возникнуть целый сноп различных частиц. Вакуум кишит частицами, надо только их оттуда извлечь! Стало ясно, что вакуум представляет собой удивительно сложную и интересную среду. Его можно было бы снова назвать эфиром, если бы не боязнь путаницы с наивным противоречивым понятием эфира XIX века.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ВАКУУМНЫХ ПОЛЕЙ

Последовательное применение квантовой механики к электромагнитному полю, взаимодействующему с электронами, было начато в конце 20-х годов в работах Дирака и завершено через 20 лет физиками-теоретиками Фейнманом, Швингером, Томонагой, Дайсоном. Возник раздел теоретической физики — квантовая электродинамика, которая позволила с большой точностью описывать все процессы взаимодействия электронов между собой и с электромагнитным полем.

Уравнение, которое в конце 20-х годов построил Поль Дирак, описывает квантовомеханическое поведение релятивистского (со скоростью, сравнимой со скоростью света) электрона во внешних полях. Из этого уравнения автоматически получался правильный магнит-

ный момент электрона, вытекали поправки к законам движения электронов в тяжелых атомах. Но самым важным было доказательство существования двойника электрона, античастицы — позитрона, отличающегося от электрона только знаком заряда. В 1932 г. это предсказание подтвердилось, позитрон был обнаружен Карлом Андерсоном.

Уравнение Дирака предсказывает существование античастицы не только для электрона, но и для любой частицы со спином $1/2$. Существует антинейтрон и антипротон. Античастицы существуют и для частиц с целым спином. Например, для частиц со спином ноль, которые описываются уравнением Клейна—Гордона—Фока.

Как применяется квантовая механика к электромагнитным полям и полям электронов и позитронов? Как возникают в вакууме колебания этих полей?

Начнем с применения квантовой механики к электромагнитному полю в вакууме. В разделе II мы уже вскользь упоминали о нулевых колебаниях электромагнитного поля. Поговорим теперь об этом подробнее.

Представим себе, что в пространстве между двумя металлическими экранами возникла стоячая электромагнитная волна. Допустим, возбужден основной тон электромагнитной волны между экранами. Тогда амплитуда напряженности электрического поля будет максимальна в средней точке и равна нулю на экранах. Электрическое и магнитное поля будут периодически колебаться. Но если какая-то величина периодически колеблется, это означает, что мы имеем дело с осциллятором, надо только выбрать подходящую обобщенную координату. Ясно, что к этому осциллятору применимы те же принципы квантования, что и к любому другому. А раз так, то энергия нашей стоячей волны должна изменяться только порциями $h\nu$.

Рассмотрим теперь бегущую волну. В этом случае тоже происходят периодические колебания, и энергия для каждого волнового вектора имеет вид, полагающийся для осциллятора. Энергия волны опять определяется соотношением $E_n = (n + 1/2)h\nu$ и изменяется порциями величины $h\nu$, но в отличие от стоячей волны бегущая обладает количеством движения, что видно из того, что она, поглощаясь крылышками радиометра, дает им импульс и заставляет вращаться. Поэтому, когда номер возбуждения бегущей волны с волновым вектором $k =$

$= 2\pi/\lambda$ увеличивается на единицу, это означает появление кванта с энергией $\varepsilon = h\nu$ и импульсом $p = h\nu/c$. Последнее соотношение представляет собой уже известную нам дебройлевскую связь импульса с длиной волны.

Теперь мы можем сказать, что световой квант — это порция энергии электромагнитной волны с данным волновым вектором. Эта волна есть квантовый осциллятор.

Электромагнитное поле в ящике с отражающими стенками есть набор электромагнитных колебаний с различными длинами волн. Каждое колебание можно рассматривать как осциллятор, в котором роль кинетической энергии играет энергия магнитного поля, а потенциальной — электрического поля.

В основном состоянии, когда энергия осциллятора минимальна, кинетическая и потенциальная энергии по отдельности не равны нулю (как было у классического осциллятора). Координата и скорость осциллятора не имеют определенных значений, так как это противоречило бы принципу неопределенности. Аналогично для каждого из осцилляторов электромагнитного поля можно указать вероятность того или иного значения электрического или магнитного поля. Электрическое и магнитное поля совершают «нулевые» колебания. Средний квадрат напряженности электрического и средний квадрат напряженности магнитного полей имеют неравные нулю значения, даже если в пространстве нет ни одной заряженной частицы и ни одного кванта электромагнитного поля.

Итак, квантовое поле описывает набор частиц-фотонов с разными энергиями и импульсами. В этом и состояла гипотеза световых квантов, развитая Эйнштейном за 20 лет до того, как она была доказана квантовой электродинамикой.

В результате квантования поля само собой возникло понятие частицы как характеристики возбуждения электромагнитной волны с определенной длиной. Так была решена проблема дуализма волн-частиц.

Существование нулевых колебаний подтверждено многими экспериментами. Так, эти колебания заставляют дрожать электрон,двигающийся в атоме. В результате электрон как бы превращается в шарик с радиусом, равным амплитуде дрожания, поэтому он слабее взаимодействует с ядром, чем точечный электрон. Энер-

гии спектральных линий, испускаемых электроном, смещаются. Это явление называется лэмбовским сдвигом — по имени впервые наблюдавшего его экспериментатора Лэмба. Теоретическое значение лэмбовского сдвига с огромной точностью совпало с экспериментальным.

Поля, описывающие частицы со спином $1/2$ (их называют ферми-поля), квантуются иначе, чем электромагнитное поле, но результат очень похож. В вакууме происходят нулевые колебания и таких полей. Существуют нулевые колебания всех возможных полей в основном состоянии; колебания, состоящие в появлении и исчезновении электрон-позитронных, нуклон-antinуклонных и других пар, пионов и других мезонов, вообще пар всех частиц с произвольным спином.

Как и фотон, эти частицы возникают как возбужденные состояния соответствующего поля. Вакуум наполнен такими неродившимися, образующимися и исчезающими частицами, они называются виртуальными. Достаточно возбудить вакуум, сталкивая, скажем, два нуклона или электрон с позитроном, как виртуальные частицы могут превратиться в реальные — при столкновении рождаются новые частицы. При достаточно большой энергии из вакуума рождаются снопы различных частиц и античастиц.

Удивительная идея — воспринимать частицы как квантовые состояния осцилляторов некоего поля — оказалась на редкость плодотворной. Она пронизывает всю современную теоретическую физику. Поле оказалось первичным понятием. Элементарные частицы возникают в результате его квантования.

Что получится, если к гравитационному полю применить квантовую механику, подобно тому как это было сделано для электромагнитного поля?

Существуют нулевые колебания гравитационного поля, аналогичные электромагнитным. Но присутствие гравитационного поля означает изменение геометрии пространства. Квантование тяготения приводит к нулевым колебаниям геометрических свойств. Отношение длины окружности к радиусу колеблется около евклидова значения; чем меньше масштаб, чем меньше радиус круга, тем большими делаются отклонения. Колебания геометрии ничтожно малы даже для очень малых размеров. Но можно указать такой масштаб, при котором не оста-

нется ничего похожего на евклидову геометрию. Он равен $P = \left(\frac{Gh}{2\pi c} \right)^{1/2} c^{-1}$.

Эта величина называется планковской длиной. Подставляя значения c , G , h (в системе CGS $c = 3 \cdot 10^{10}$; $G = 6,7 \cdot 10^{-8}$; $h = 10^{-27}$), получим: $P = 2 \cdot 10^{-33}$ см.

Несмотря на такую малость, эта длина, по-видимому, сыграет важную роль в будущей теории, которая объединит гравитацию со всеми остальными взаимодействиями — электромагнитным, сильным и слабым. Об этом объединении мы сейчас и поговорим.

ПОИСКИ ЕДИНСТВА

Важнейшее направление, по которому развивалась физика, — поиски единых причин для явлений разного круга, попытки объединить различные области физической науки.

Важный шаг на этом пути сделал Ньютон. Он доказал, что падение тел на Земле, движение Луны вокруг Земли и движение звезд определяются одной причиной — притяжением с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Он показал, что все эти явления можно количественно рассчитать с помощью сформулированных им законов механики.

Следующий, не менее грандиозный шаг сделал Джеймс Максвелл. Он получил удивительные уравнения, объединившие все явления электричества, магнетизма и оптики. Замечательный немецкий физик Людвиг Больцман сказал об уравнениях Максвелла словами из «Фауста» Гёте: «Не Бог ли начертал эти письмена?»

В начале XX в. физики знали только два типа взаимодействий — электромагнитное и гравитационное. Уже первые исследования атомных ядер показали, что нейтроны и протоны, входящие в состав ядра, удерживаются силами, в десятки раз большими электромагнитных. Эти частицы связаны «сильными» взаимодействиями. Кроме того, были обнаружены гораздо более слабые силы между электронами, нейтрино и нуклонами (нейтронами и протонами). Эти взаимодействия ответственны за радиоактивный распад и названы «слабыми». Они вызывают, в частности, превращение свободного нейтрона в протон, электрон и антинейтрино.

До недавнего времени казалось, что между четырьмя взаимодействиями — сильным, слабым, гравитационным и электромагнитным — не существует никакой связи. В последние десятилетия усилия физиков были направлены на их объединение. Электромагнитное и слабое взаимодействия объединяются в «электрослабое». Они оказались проявлениями более общего единого взаимодействия. В чем красота такого объединения?

Возникли неожиданные связи между разнородными явлениями. Так, постоянная, определяющая величину слабого взаимодействия, оказалась связанной с зарядом электрона. Теория объяснила многие явления, казавшиеся раньше загадочными.

Еще далека от завершения, но, можно надеяться, на верном пути теория Великого объединения, которая даст единое объяснение электромагнитным, слабым и сильным взаимодействиям. Согласно предсказаниям этой теории протон не стабильная частица, время распада протона на позитрон и нейтральный пион или на нейтрино и положительный пион составляет примерно 10^{30} — 10^{33} лет. Уже поставлен ряд опытов по проверке этого предсказания. Если распад обнаружится, то по крайней мере подтвердится идея Великого объединения.

В последнее время многие теоретики пытаются создать теорию Суперобъединения, которая охватила бы все четыре взаимодействия. Картина только начала возникать. Она еще недостаточно красива и, значит, далека от истины. И тем не менее уже сейчас ясно, что мы на пути к более глубокому пониманию величественной красоты, скрытой во Вселенной.

Научно-популярная серия

Аркадий Бенедиктович Мигдал

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА И НИЛЬС БОР

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин. Редактор К. А. Кутузова. Мл. редактор В. Я. Бирюкова. Обложка художника О. Г. Черных. Худож. редактор П. Л. Храмцов. Техн. редактор Л. А. Солнцева. Корректор Н. Д. Мелешкина.

ИБ № 8651

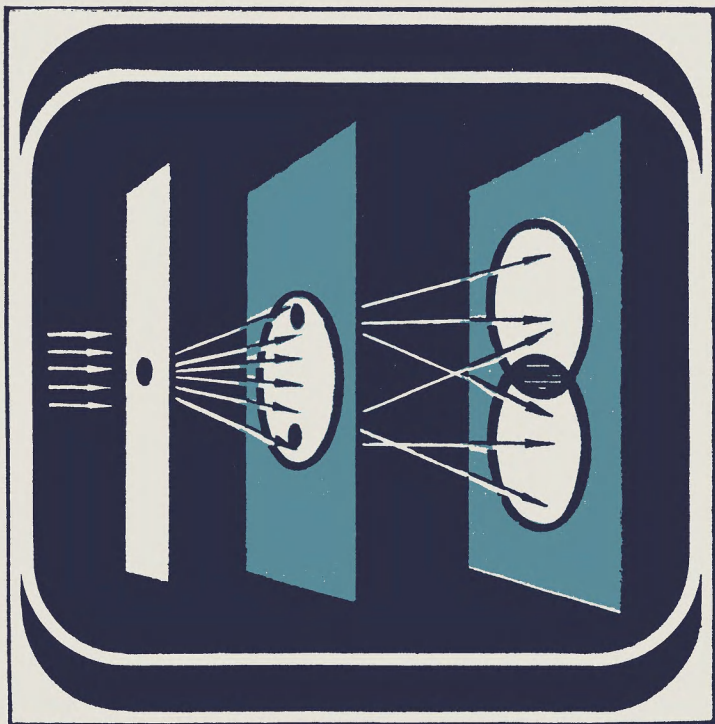
Сдано в набор 03.12.86. Подписано к печати 28.01.87. Т 01218. Формат бумаги $84 \times 108^{1/32}$. Бумага тип № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,48. Тираж 35 040 экз. Заказ 2826. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 874003. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА