

Мигдал А. Б.

Квантовая физика и Нильс Бор

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
М57

М57 **Мигдал А. Б.**
Квантовая физика и Нильс Бор / Мигдал А. Б. — М.: Книга по Требованию,
2012. — 64 с.

ISBN 978-5-458-33403-7

В популярной форме излагается история развития квантовой физики от ее зарождения до создания квантовой механики. Основные задачи квантовой механики — квантование в различных потенциалах, рассеяние, прохождение через барьер — решаются на качественном уровне. Прослежены*!- события научной жизни Нильса Бора, сформировавшие его как философа квантовой физики. Подробно рассматриваются физические и философские основы квантовой теории. Обсуждается дальнейшее развитие квантовой физики: квантовая механика релятивистских частиц тгнгр им биение квантовой механики к электромагнитному и другим полям.

ISBN 978-5-458-33403-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

отношения ν/T (закон Вина). Это предположение, как стало ясно позже, подтверждается экспериментальными 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-

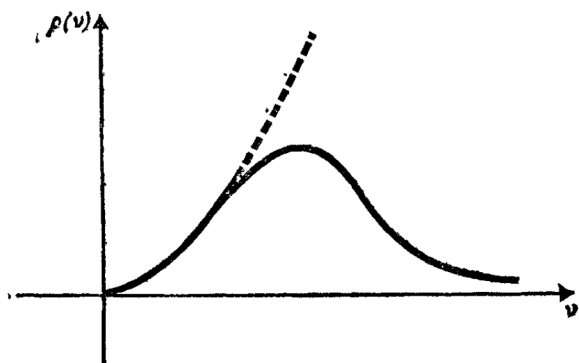


Рис. 1. Зависимость интенсивности черного излучения от частоты. Пунктиром показан ход интенсивности, соответствующий классической статистической физике (закон Рэлея — Джинса)

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 незначительна. 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 наименьшей 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 Рэлея — 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 несколько 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» $\bar{E}_1 = \rho / N_\nu$ 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 проясняться 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 Милликенom. 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 полноправной 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