



Волновые функции

На пороге XX века физики были полны надежд и полагали, что скорым шагом идут к полному пониманию нашей Вселенной. Она, как считалось тогда, состоит из частиц, которые движутся под действием полей.

Идея о том, что **поля** заполняют пространство, формировалась на протяжении XIX столетия. Еще Лаплас предложил новый взгляд на учение Ньютона — четкую и гармоничную теорию движения и гравитации, изложил ее в терминах гравитационного поля, которое простирается между всеми объектами во Вселенной. Полем считается все, что угодно, если оно имеет значение в каждой точке пространства. Значением может быть число, вектор или же что-то более сложное. Главное, чтобы поле охватывало весь мир.

Мы можем описать движение тел безо всяких полей, именно так, как делал Ньютон, то есть просто считать, что объекты воздействуют друг на друга путем гравитации. В решении этой задачи поле — всего лишь альтернативный метод расчета, который мы можем использовать, если захочется. Именно так и считалось долгое время.

Но в XIX веке, когда ученые занялись магнетизмом и электричеством, все изменилось. То, как заряженные тела воздействуют друг на друга, естественным образом показывает, что между ними есть электрическое поле. Майкл Фарадей обнаружил, что магнит, двигаясь рядом с проводом, порождает в нем электрический ток. Магнит и провод не соприкасаются, а значит, их связывает еще одно, магнитное, поле. В 1873 году Джеймс Клерк Максвелл объединил знания об обоих полях в единую компактную теорию — **электромагнетизм**, при помощи которой можно объяснить разнообразные магнитные и электрические явления. Огромная победа в области унификации! Уравнения Максвелла и по сей день кошмарят молодых студентов-физиков.

Одним из триумфальных следствий теории Максвелла стало понимание природы **света**. Свет — это не вещество, а **волна**, которая движется в электрическом и магнитном полях, **электромагнитное излучение**. В обычном представлении поле — лишь нечто, передающее силы. Действительно, так и есть. Однако, по мнению Максвелла, поля не сохраняют неподвижность, а могут колебаться. Именно колебания электромагнитного поля люди и воспринимают как свет. Кванты света, или фотоны, — это частицы. Поэтому иногда говорят, что «фотоны обладают электромагнитной силой». Пока что мы будем думать о них, не выходя за грань классической физики.

Возьмем одну заряженную частицу, например электрон. Будучи неподвижен, он окружен электрическим полем, сила которого будет ослабевать по закону обратных квадратов, как и в случае с **гравитацией Ньютона**¹. Когда электрон начинает двигаться, происходят две вещи: во-первых, силовые линии поля, которые направлены на него, сдвигаются, а во-вторых, в дополнение к электрическому возникает небольшое магнитное поле. Оба фактора (небольшое магнитное поле и столь же малое отклонение в электрическом) порождают волну, похожую на круги, которые расходятся по воде от брошенного камня. Максвелл определил, что скорость распространения этой волны в точности равна скорости света: она ведь и есть свет. От радиоволн до рентгеновских и гамма-лучей, свет — это распространение колебаний электромагнитного поля. Практически весь свет, что мы видим вокруг себя, исходит от заряженных частиц, вибрирующих где-то на Солнце или на нити лампы накаливания.

¹ Позже в этой книге мы убедимся в том, что закон обратных квадратов справедлив как для гравитации, так и для электромагнетизма. Все потому, что оба поля не имеют массы, поскольку существует такая штука, как калибровочная инвариантность.

Все в том же XIX веке ученые поняли, сколь важную роль в нашем мире играют **частицы**. Во главе с Джоном Дальтоном химики отстаивали идею о том, что материя состоит из **атомов**, уникальных для каждого химического элемента. Чуть с запозданием к ним подключились и физики: как оказалось, движением атомов газа легко объяснить температуру, давление и энтропию.

Заимствуя слово «атом» у древних греков, которые называли так неделимые элементарные частицы материи, ученые несколько поспешили. Сегодня мы знаем, что атомы, эти «кирпичики», из которых строятся вещества, вовсе не неделимы. Грубо говоря, атом состоит из **ядра** и **электронов**, которые вращаются вокруг него. Ядро, в свою очередь, состоит из **протонов** и **нейтронов**. Скоро мы несколько уточним это представление. Протоны имеют положительный заряд, электроны — отрицательный, нейтроны же не имеют заряда. При равных количествах электронов и протонов заряды компенсируют друг друга, поэтому атом сам по себе нейтрален. Протон и нейтрон весят почти одинаково, нейтрон лишь чуть тяжелее, а вот электрон намного, примерно в 1800 раз, легче. Поэтому большая часть массы человека, как и любого другого макроскопического объекта, приходится на протоны и нейтроны. Благодаря легким, а потому и более подвижным электронам происходят химические реакции, течет электрический ток. В начале XX века никто не мог и подумать о том, о чем прекрасно известно сегодня: сами протоны с нейтронами состоят из более мелких частиц — **кварков**, соединенных друг с другом **глюонами**.

Такое представление об атомах складывалось постепенно. В 1897 году британский физик Дж. Дж. Томсон открыл электроны, измерил их заряд и установил, что они существенно легче атомов. Отсюда следовало, что атом состоит из двух частей: легких отрицательно заряженных электронов и какого-то тяжелого положительно заряженного тела. Несколько лет спустя

Томсон пришел к идее о том, что электроны находятся внутри этого тела, словно изюм в рождественском пудинге. Именно так и назвали эту модель.

Продержалась она недолго: до ставшего знаменитым эксперимента, который провели Эрнест Резерфорд, Ганс Гейгер и Эрнест Марсден. Ученые направляли альфа-частицы (которые, как мы знаем теперь, просто ядра атомов гелия) на тонкий лист золотой фольги. Предполагалось, что большинство частиц пройдет сквозь него напрямую. Если же на пути частица столкнется с атомом, ее траектория изменится, но незначительно. Ведь масса «изюма» слишком мала, а заряд «пудинга» слишком распределен в пространстве, чтобы вызывать сильные отклонения.

На деле же большинство частиц действительно пролетали через фольгу, но некоторые сильно отклонялись и даже отскакивали от нее и летели в обратную сторону. Такое могло случиться только в одном случае: на их пути встречалось что-то тяжелое, от чего можно было отскочить. В 1911 году Резерфорд объяснил этот результат. По его мнению, положительный заряд сосредоточен в маленьком, но тяжелом центральном ядре, и если частице не повезло угодить прямо в него, она отклоняется в сторону под острым углом. Именно это и наблюдалось. В 1920 году Резерфорд предположил, что существуют протоны (которые были тогда известны как ядра атомов водорода), а в 1921 году — еще и нейтроны (которые были в итоге открыты в 1932 году).

Все складывается, думал обычный физик эпохи *fin de siècle*¹. Материя состоит из частиц, частицы взаимодействуют посредством

¹ Конец века (*фр.*). Эпитет негативных культурных явлений, имевших место в Европе на рубеже XIX и XX веков: прежде всего отказа от общественной жизни и традиционных культурных норм. Говоря о положительных явлениях того же времени, обычно используют словосочетание *belle Époque* — прекрасная эпоха. — *Примеч. пер.*

сил, а силы переносятся полями. Всё в точности по законам классической физики. Динамику частиц описать несложно: достаточно задать импульсы и координаты, после чего применить законы Ньютона или же их аналоги. С полями, в целом, все то же самое, вот только вместо координат будут значения поля во всех точках пространства, а вместо импульсов — скорости их изменения. Легко, поддавшись искушению, подумать, что близок час, когда люди поймут все на свете. В 1894 году, открывая новую лабораторию физики в Чикагском университете, Альберт Майкельсон сказал: «Большинство великих фундаментальных принципов [физики] уже, вероятно, четко определены».

Он сильно ошибался.

Однако таких, как он, было немного. Другие физики, начиная с самого Максвелла, осознавали: изученные свойства частиц и волн не всегда идут в ногу с классическими представлениями. Ошибочно считается, что Уильям Томсон, лорд Кельвин, как-то сказал: «В физике больше нечего открывать. Нам остается лишь измерять, все точнее и точнее». На самом деле он думал совсем иначе. В 1900 году на одной из лекций он говорил о двух «грозовых тучах», нависших над физикой. Одна из них в конечном итоге будет развеяна теорией относительности, вторая же — квантовой механикой.

Излучение абсолютно черного тела

История науки сложна и запутанна. Развитие редко идет по прямому пути, который мы можем увидеть, оглядываясь в прошлое. Квантовая механика создавалась беспорядочно и болезненно. Не будем тут обсуждать все подробности этой истории, сосредоточимся лишь на двух непонятных вещах, которые дали толчок квантовой революции: частицах, ведущих себя как волны, и волнах, ведущих себя как частицы.

Сначала обсудим корпускулярные свойства света. Ученые узнали о них, размышляя об **излучении абсолютно черного тела** (АЧТ) — объекта, который поглощает весь падающий на него свет. Рассматривая картину, мы видим хитросплетение форм и красок, которые отражают свет. Но стоит его погасить, как краски померкнут, останется только тепло: тепловое излучение. Оно возникает из-за вибраций частиц, из которых состоит любая вещь, то есть температуры, как понимают это явление физики. Частота излучения тем выше, чем выше скорость этих вибраций. Поэтому всякий объект с ненулевой температурой излучает тепло, но только у абсолютно черного тела на излучение не влияют ни цвет, ни отражательная способность, ни что-то иное. Только температура: при низкой — АЧТ излучает в инфракрасном и радиочастотном диапазоне, а при высокой — в видимом, ультрафиолетовом и даже рентгеновском.

На первый взгляд в изучении абсолютно черного тела нет ничего сложного. Важна лишь температура, а остальные свойства не имеют значения (можно сказать, перед нами «сферическая корова в вакууме»¹). Температура зависит от кинетической энергии атомов, из-за наличия заряженных частиц внутри которых возникает электромагнитное излучение. Нам нужно определить его интенсивность в зависимости от длины волны — получить спектр абсолютно черного тела.

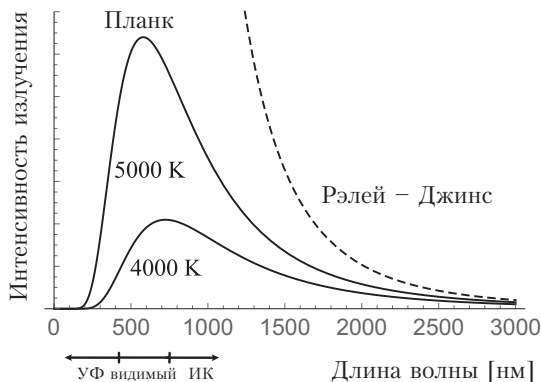
Физики XIX века пытались решить эту задачу двумя способами: измерением и расчетом. На результаты измерений было приятно посмотреть: плавная кривая — **спектр** абсолютно черного тела — поднималась от нуля при малых длинах волн до пика,

¹ Отсылка к первой книге Шона Кэролла из серии «Величайшие идеи Вселенной», где он рассказывал о «принципе сферической коровы». В российской традиции обычно говорят о «сферическом коне в вакууме». — *Примеч. ред.*

а затем опускалась, стремясь к нулю при больших. Длина волны максимума кривой зависела только от температуры.

А вот с теорией не получалось. Вильгельм Вин в 1896 году и Джон Стретт, лорд Рэлей, в 1900-м предложили два варианта расчета. Первый из них хорошо подходил для малых длин волн, но при больших давал существенные отклонения от измеренных значений. Второй же, напротив, отлично работал при больших длинах, зато при малых показывал бесконечную интенсивность излучения.

Формула Рэля, позднее улучшенная Джеймсом Джинсом, обычно считается неплохим описанием мира, живущего по законам классической физики. Ошибку, которая появляется при малых длинах волн, окрестили «**ультрафиолетовой катастрофой**». Физики-затейники называют всё, что происходит на коротких длинах волн, ультрафиолетовым (УФ), а на длинных — инфракрасным (ИК). А расхождение между теорией и практикой — это всегда катастрофа. Относительная простота расчетов в инфракрасном диапазоне и относительная сложность вычислений в ультрафиолетовом еще аукнутся нам, когда мы придем к квантовой теории поля.



Проблемой решил заняться немецкий физик Макс Планк (по легенде, один профессор отговаривал его заниматься физикой, ведь в этой науке «уже почти все открыто»). В 1900 году он смог найти компромисс между Вином и Рэлеем — Джинсом: формулу, которая прекрасно работала и для малых, и для больших длин волн, а также всего того, что находится посередине. Знаменитый **закон Планка** позволяет найти интенсивность излучения абсолютно черного тела B с температурой T для любой длины волны λ :

$$B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}. \quad (1.1)$$

Здесь « \exp » — экспоненциальная функция: $\exp(x) = e^x$. Помимо температуры T и длины волны λ , в этом выражении есть еще три величины: скорость света c , постоянная Больцмана k_B из термодинамики, а также новая постоянная h , которую Планку пришлось ввести, чтобы формула заработала. Это число, известное теперь как **постоянная Планка**, появляется везде, где действует квантовая механика:

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (1.2)$$

Джоуль (Дж) — это единица измерения энергии. Именно столько лампочка мощностью в один ватт потребляет за одну секунду. По разным причинам h нередко приходится делить на 2π . Поэтому мы введем еще одну константу, которая называется **приведенной постоянной Планка**:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}. \quad (1.3)$$

Мы скоро увидим, что « h с чертой» встречается в формулах настолько часто, что возникает желание выбрать единицы измерения, при которых $\hbar = 1$ (точно так же, как в теории отно-

сительности удобно принять скорость света равной единице, $c = 1$). Впрочем, пока что мы оставим все как есть.

Первоначально Планк не столько вывел, сколько подобрал свою формулу: просто путем математических манипуляций объединил результаты трудов Вина и Рэлея — Джинса в одно компактное выражение. Однако потом он потратил немало сил на то, чтобы понять, почему оно получилось настолько удачным. Это было непросто, отчасти потому, что в глубине сердца Планк был физиком-консерватором. Он не любил статистическую механику в духе Максвелла и Людвиг Бальцмана, в которой законы термодинамики пытались объяснить коллективным действием большого количества атомов, скептически относился к существованию последних, до самой смерти сомневался в квантовой физике. Но все это не помешало Планку выдвинуть гениальную гипотезу, которая и позволила разрешить проблему излучения абсолютно черного тела.

Основная идея была в том, что количество энергии, выделяющейся с электромагнитным излучением при вибрации заряженных частиц, невозможно выразить любым числом. Энергия выделяется дискретно, причем ее количество зависит от частоты, которая связана с длиной волны через скорость света: $f = c/\lambda$. Чем выше частота, тем больше энергии. То есть согласно хорошо известной в наши дни формуле,

$$E = hf, \quad (1.4)$$

мы снова видим здесь постоянную Планка. Причем поскольку использовать угловую частоту $\omega = 2\pi f$ вместо обычной, как правило, удобнее, эта формула часто выглядит так: $E = \hbar\omega$.