

**Тридцать лет,
которые потрясли физику**
История квантовой теории

ПРЕДИСЛОВИЕ

Две великие революционные теории изменили лицо физики в первые десятилетия двадцатого века: теория относительности и квантовая теория. Первая была, по сути, создана одним человеком, Альбертом Эйнштейном, и состояла из двух частей: специальной теории относительности, опубликованной в 1905 году, и общей теории относительности, опубликованной спустя 10 лет. Теория относительности Эйнштейна повлекла за собой радикальные изменения в классической ньютоновской концепции пространства и времени как двух независимых сущностей физического мира и привела к единому четырехмерному миру, в котором время рассматривается как четвертая координата, хотя и не совсем эквивалентная трем пространственным координатам. Теория относительности внесла важные изменения в трактовку движения электронов в атоме, движения планет в Солнечной системе и движения звездных галактик во Вселенной.

Квантовая теория, со своей стороны, является результатом творчества нескольких великих ученых, начиная с Макса Планка, который первым ввел в физику понятие кванта энергии. Теория прошла много этапов эволюции и дала нам глубокое понимание структуры атомов и атомных ядер, а также тел привычных нам размеров. На сегодняшний день квантовая теория еще не завершена, особенно в областях, связанных с теорией относительности и проблемой элементарных частиц, решение которой временно приостановлено в связи с невероятными сложностями, встающими на пути к решению этой проблемы.

О квантовой теории мы и поговорим в этой книге. В возрасте восемнадцати лет автор впервые познакомился с моделью атома

Бора в Ленинградском университете, а затем, позже, в возрасте двадцати четырех лет, ему посчастливилось стать студентом Бора в Копенгагене. В те памятные годы на улице Блегдамсвей (адрес Института Бора) он имел возможность встречаться со многими учеными, оказавшими влияние на первоначальное развитие квантовой теории, и участвовать в их беседах. Изложенное в этой книге во многом является производным того опыта, который автор получил, общаясь с этими великими учеными и в первую очередь с горячо любимым им Нильсом Бором. Автор надеется, что новое поколение физиков найдет для себя много интересного на этих страницах.

*Январь 1965 года
Георгий Гамов*

ВВЕДЕНИЕ

Начало двадцатого века предвещало начало беспрецедентной эры переворота в сознании и переоценки классической теории, лежащей в основе физики, начиная с доньютоновских времен. В своей речи на конференции Немецкого физического общества 14 декабря 1900 года Макс Планк заявил, что, если исходить из предположения о том, что энергия излучения может существовать только в форме отдельных скоплений, можно разрешить парадоксы, которыми изобилует классическая теория излучения и поглощения света материальными телами. Планк назвал эти скопления энергии световыми квантами. Пять лет спустя Альберт Эйнштейн успешно применил теорию световых квантов, объяснив с ее помощью эмпирические законы фотоэффекта (выбивание электронов из металлических поверхностей под воздействием фиолетового и ультрафиолетового света). Еще позже Артур Комптон провел свой знаменитый эксперимент, который показал, что рассеяние рентгеновских лучей свободными электронами подчиняется тем же законам, что и абсолютно упругое соударение. Так, в течение последующих пяти лет инновационная идея квантования энергии излучения прочно закрепилась в теоретической и экспериментальной физике.

В 1913 году датчанин Нильс Бор развил идею Планка о квантовании энергии излучения, описав механическую энергию электронов в пределах атома. Разработав четкие «правила квантования» для механических систем размеров атома, он вывел логическое объяснение планетарной модели атома Эрнеста Резерфорда. Эта модель была доказана экспериментально, однако вступала в серьезные противоречия с другими фундаментальными положениями классической физики. Бор рассчитал энергию отдельных

квантовых состояний электрона и определил световое излучение как испускание светового кванта с энергией, количественно равной разнице энергий начального и конечного квантового состояния атомного электрона. Благодаря этим расчетам он смог дать детальное объяснение проблеме, десятилетиями мучившей спектроскопистов: спектральным линиям водорода и более тяжелых элементов. Первая работа Бора по квантовой теории атома стала поворотным моментом.

В течение десяти лет совместными усилиями физиков-теоретиков и специалистов в различных областях экспериментальной физики были более детально описаны оптические, магнитные и химические свойства некоторых атомов. Но с годами становился все более очевидным тот факт, что теория Бора, несмотря на свой успех, не была окончательной, так как не могла объяснить некоторые вещи, уже известные об атомах. Например, она никак не описывала процесс перехода электрона из одного квантового состояния в другое, равно как не существовало способа рассчитать интенсивность различных линий оптических спектров.

В 1925 году французский физик Луи де Бройль опубликовал исследование, в котором предложил довольно неожиданную трактовку квантовых орбит Бора. По мнению де Бройля, движение каждого электрона происходит под действием неких загадочных волн-пилотов, чья скорость распространения и длина зависят от скорости этого электрона. Полагая, что длина волн-пилотов обратно пропорциональна скорости электрона, де Бройлю удалось показать, что различные квантовые орбиты в водородной модели атома Бора могут вмещать целое количество волн-пилотов. Таким образом, модель атома стала похожа на музыкальный инструмент с основным тоном (самая близкая к центру орбита с наименьшим количеством энергии) и обертонами (внешние орбиты с большим энергетическим потенциалом). Спустя год после публикации исследования Бройля австрийский физик Эрвин Шредингер развил его идеи и облек их в математически точную форму — так появилась его волновая механика. Волновая механика объясняла и те процессы, которые удалось объяснить Бору, и ряд других, с которыми теория Бора не справлялась (например, интенсивность спектральных линий). Кроме того, Шредингер предсказал некоторые новые явления (дифракция электронного пучка), о которых классическая физика и теория Планка—Бора не могли и предполагать. Фактически волновая механика

ка представляла собой абсолютно полную и самодостаточную теорию всех атомных явлений и, как выяснилось в двадцатые годы, могла объяснить явления радиоактивного распада и искусственных ядерных превращений.

Одновременно с работой Шредингера по волновой механике появилось исследование молодого немецкого физика Вернера Гейзенберга, чей подход к проблемам квантовой физики использовал так называемую некоммутативную алгебру (математическая дисциплина, которая предполагает, что $a \times b$ не обязательно тождественно $b \times a$). Одновременное появление работ Шредингера и Гейзенберга в двух немецких журналах («Annalen der Physik» и «Physikalische Zeitschrift») потрясло мир теоретической физики. Два исследования были настолько не похожи друг на друга, насколько это вообще возможно, но приходили к одним и тем же выводам касательно атомной структуры и атомных спектров. Ученым потребовалось больше года для того, чтобы понять, что с точки зрения физики эти теории были абсолютно идентичны, несмотря на то что математически были представлены по-разному. Это как если бы Колумб открыл Америку, двигаясь через Атлантический океан на запад, одновременно с таким же отважным японским мореплавателем, двигавшимся через Тихий океан на восток.

Однако у квантовой теории было слабое место, которое давало о себе знать при попытках квантования механических систем, т.к. ученым приходилось работать с величинами скоростей близкими к скорости света, а это требовало релятивистского подхода. Было совершено множество неудачных попыток объединить теорию относительности и квантовую теорию, пока, наконец, в 1929 году британский физик Поль Дирак не вывел свое знаменитое релятивистское волновое уравнение. Решения этого уравнения позволяли полностью описать движение электронов атома на скоростях близких к скорости света и объясняли их линейные и угловые механические импульсы, а также магнитный момент, что, безусловно, было приятным бонусом. Некоторые формальные трудности, связанные с анализом этого уравнения, привели Дирака к выводу о том, что наряду с обычными отрицательно заряженными электронами существуют и положительно заряженные антиэлектроны.

Его предсказание полностью подтвердилось несколько лет спустя, когда антиэлектроны были обнаружены в космических лучах. Теория античастиц расширилась со временем, и теперь

принято говорить не только об антиэлектронах, но и антипротонах, антинейтронах, антимезонах и так далее.

Так, к 1930 году, всего лишь через три десятилетия после судьбоносного заявления Планка, квантовая теория полностью оформилась и стала такой, какой мы видим ее сейчас¹. В течение этого времени были сделаны лишь незначительные теоретические поправки. С другой стороны, этот период был очень плодотворным с точки зрения экспериментальных исследований, особенно в области изучения вновь открытых элементарных частиц. Тем не менее от понимания самой сути элементарных частиц, их масс, зарядов, магнитных моментов и взаимодействий нас отделяет прочная стена, которую мы надеемся в скором времени сломить. Когда этот прорыв произойдет, мы, вне всяких сомнений, будем иметь дело с понятиями, настолько далекими от существующих в современной физике, как современные далеки от понятий классической.

В последующих главах мы попытаемся описать бурное развитие квантовой теории энергии и материи в течение первых тридцати лет ее существования, делая акцент на принципиальных различиях между «старой доброй» классической физикой и новым подходом, берущим свое начало в двадцатом веке.

¹ На момент первой публикации, 1966 г. — *Примеч. ред.*



Глава 1

ПЛАНК И СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

Корни революционного заявления Планка о том, что свет может излучаться и поглощаться только в форме отдельных скоплений энергии, лежат в гораздо более ранних работах Людвиг Больцмана, Джеймса Клерка Максвелла, Джозайи Уилларда Гиббса и других, в которых мы находим статистическое описание тепловых свойств физических тел.

Согласно кинетической теории тепла, тепло является результатом случайного движения многочисленных отдельных молекул, из которых состоят все физические тела. В силу того, что движение каждой молекулы, участвующей в тепловом движении, отследить не только невозможно, но и бессмысленно, при математическом описании тепловых явлений необходимо использовать статистический метод.

Подобно тому, как экономист не знает, сколько именно гектаров земли засеивает фермер Джон Доу и как много у него свиней, физику не важно положение или скорость отдельной молекулы из огромного количества, входящих в состав газа. Будь то экономика страны или наблюдение за поведением газа, важны лишь средние значения.

Один из базовых законов статистической механики (раздел физики, изучающий средние значения физических свойств для

крупных сосредоточений отдельных частиц,двигающихся беспорядочно) — это так называемая теорема о равномерном распределении, которая математически выводится из ньютоновских законов механики. Согласно ей, общее количество энергии, содержащееся в сосредоточении большого количества отдельных частиц, обменивающихся энергией между собой через соударения, распределено равномерно (в среднем) между всеми частицами. Если все частицы идентичны, как, например, в чистых газах — кислороде или неоне, — то в среднем они все движутся с одинаковой скоростью и имеют одинаковую кинетическую энергию. Если обозначить общую энергию системы как E , а общее количество частиц принять за N , то среднее количество энергии для каждой частицы — это E/N . Если мы имеем дело с различными частицами, как, например, в смесях двух и более газов, то более крупные молекулы будут иметь меньшие скорости движения, таким образом их кинетические энергии (пропорциональные массе и квадрату скорости) в среднем будут такими же, как у более легких молекул.

Рассмотрим, к примеру, смесь водорода и кислорода. Молекулы кислорода, которые в шестнадцать раз превосходят молекулы водорода по массе, будут иметь среднюю скорость в $\sqrt{16} = 4$ раза меньше*.

В то время как закон равномерного распределения энергии регулирует распределение энергии между членами крупных скоплений частиц, скорость и энергия отдельных частиц может отклоняться от средних значений, это явление получило название «статистические флуктуации».

Флуктуации также можно представить математически, рассмотрев кривые, показывающие относительное количество частиц, имеющих скорости, отклоняющиеся от средних значений в большую или меньшую сторону для любой из заданных температур. Эти кривые, впервые рассчитанные Джеймсом Максвеллом и названные в честь него, показаны на рис. 1 для трех различных температур газов.

* Так как кинетическая энергия рассчитывается как произведение массы и квадрата скорости, то ее значение останется неизменным, если масса увеличивается в 16 раз, а скорость уменьшается в 4 раза. В самом деле, $4^2 = 16!$ — *Здесь и далее, за исключением отдельно оговоренных случаев, примечания автора обозначены звездочками, примечания переводчика — цифрами.*

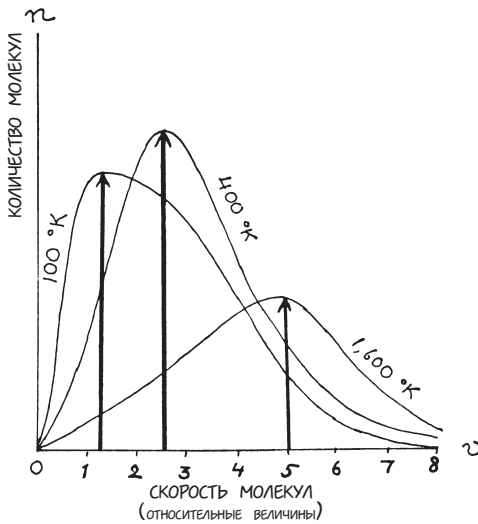


Рис. 1. Распределение Максвелла: количество молекул, имеющих различные скорости v , изображено в зависимости от скоростей для трех различных температур, 100, 400 и 1600 °K. Так как количество молекул в сосуде остается неизменным, площади участков под тремя кривыми равны между собой. Средние скорости молекул увеличиваются пропорционально квадрату абсолютной температуры.

Использование статистического метода в изучении теплового движения молекул позволило объяснить тепловые свойства физических тел, в особенности это касается газов. Применительно к газам, эта теория значительно упрощается в силу того, что молекулы газа свободно передвигаются в пространстве и не прижаты плотно друг к другу, как в жидкостях и твердых телах.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

К концу девятнадцатого века лорд Рэлей и Джеймс Джинс сделали попытку применить статистический метод, ставший ключом к пониманию тепловых свойств физических тел, к решению проблем при изучении теплового излучения. Все физические тела при нагревании излучают электромагнитные волны различной длины. Когда температура относительно низкая — например, тем-