

§ 1. Введение

Согласно *классической доктрине*, общепринятой среди физиков до начала XX века, описание эволюции физических систем производится с помощью некоторого числа величин, так называемых *динамических переменных*; все эти переменные в каждый момент времени имеют вполне определенные значения, так что задание всей совокупности этих значений определяет динамическое состояние системы в данный момент времени; принимается, кроме того, что эволюция физической системы во времени полностью задана, если известно ее состояние в некоторый начальный момент. Математически эта основная аксиома выражается тем фактом, что динамические переменные как функции времени удовлетворяют системе дифференциальных уравнений первого порядка. Программа классической теоретической физики включает, таким образом, определение динамических переменных исследуемой системы, а затем установление тех уравнений движения, которые описывают их изменение во времени в согласии с опытными данными.

С тех времен, когда Ньютон формулировал основные законы механики, и до конца XIX века эта программа развивалась вполне успешно, причем появлению новых экспериментальных фактов в теоретическом плане соответствовало либо введение новых динамических переменных и новых уравнений, либо изменение старых уравнений, что позволяло без больших затруднений включить новое явление в общую теоретическую схему. В течение всего этого периода ни один опытный факт, ни одно физическое открытие не поставили под сомнение строгую обоснованность самой программы. Напротив, классическая физика непрерывно прогрессировала в направлении наибольшей простоты и наибольшего согласия и единства в описании всей совокупности физических явлений. Это счастливое развитие продолжалось примерно до 1900 г., но в дальнейшем, по мере накопления и углубления знаний о физических явлениях на

микроскопическом уровне¹⁾, классическая теория столкнулась с целым рядом трудностей и противоречий. Быстро стало очевидным, что физические явления на атомном и субатомном уровнях вообще не могут быть описаны на основе классической доктрины и для их объяснения нужны совершенно новые принципы. Открытие и утверждение этих новых принципов прошло несколько этапов и только к 1925 году, к моменту появления квантовой механики, была построена связанная и непротиворечивая теория микроскопических явлений. В этой главе мы познакоимся с истоками и историческим развитием новой теории.

После краткого очерка основных положений и идей классической теоретической физики мы представим обзор основных физических явлений, открытие которых заставило отказаться от классических идей. Эти явления мы предполагаем известными читателю²⁾, так что ограничимся напоминанием только основных особенностей, подчеркивая те аспекты явлений, которые находятся в противоречии с классической теорией. Конец главы посвящен краткому обзору первых попыток объяснения этих явлений, которые известны под именем Старой квантовой теории.

Раздел I. КОНЕЦ КЛАССИЧЕСКОГО ПЕРИОДА

§ 2. Классическая теоретическая физика

В конце классического периода отдельные ветви физики объединились в единую и согласованную теоретическую картину мироздания, основные контуры которой таковы. В окружающей нас вселенной мы различаем две категории объектов: *вещество* и *излучение*. Вещество состоит из точно локализуемых корпускул, движение которых подчиняется законам механики Ньютона; состояние каждой корпускулы определяется в каждый момент ее положением и скоростью (или количеством движения — импульсом), т. е. всего шестью динамическими переменными. Излучение подчиняется законам электромагнитной теории Максвелла; динамические переменные излучения — число их бесконечно — суть составляющие в каждой точке пространства элек-

¹⁾ Следует уточнить понятия микроскопических и макроскопических явлений, которые будут часто использоваться в этой книге. Микроскопическая шкала соответствует атомным и субатомным явлениям, для которых характерны длины не более нескольких ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$). Макроскопическая же шкала соответствует явлениям, которые можно наблюдать невооруженным глазом или с помощью обычного микроскопа с разрешением не более микрона (10^{-4} см).

²⁾ Детальное описание этих явлений можно найти в различных книгах, посвященных атомной физике: например, *M. Born, Atomic Physics, Blackie (Glasgow, 1957)* или *G. Bruhat, Optique, Masson (Paris, 1954)*; см. русский перевод первой книги: *М. Борн, Атомная физика, «Мир», 1965.*

трического и магнитного полей. В отличие от вещества излучение нельзя разделить на отдельные корпускулы, локализованные в пространстве и сохраняющие эту локализацию с течением времени; излучение описывается волновыми процессами, которые находят свое отражение в хорошо известных явлениях интерференции и дифракции.

Корпускулярная теория вещества развивалась в течение всего XIX века. Вначале она ограничивалась механикой небесных тел и объектов макроскопических размеров, но в дальнейшем, когда была выдвинута атомная гипотеза строения вещества, корпускулярная теория стала рассматриваться как основа объяснения всех физических явлений и на микроскопическом уровне. Ввиду невозможности прямой проверки атомной гипотезы путем изоляции отдельных молекул и изучения их взаимодействия большое внимание было уделено косвенным доказательствам того, что макроскопические свойства материальных тел следуют из законов движения отдельных молекул, их составляющих. Математически эта проблема оказалась чрезвычайно сложной. Действительно, согласно гипотезе макроскопические величины должны рассматриваться как средние значения динамических переменных системы, обладающей очень большим числом степеней свободы³⁾. Не может быть и речи о точном решении уравнений движения такой системы и приходится прибегать к статистическим методам исследования. Так родилась и стала развиваться новая дисциплина — статистическая механика. Новые результаты в исследовании газов (кинетическая теория газов) и термодинамике (статистическая термодинамика) позволили проверить качественно, а в рамках возможной точности расчетов и количественно, основные положения корпускулярной теории вещества⁴⁾.

Волновая теория излучения также покоилась на солидной основе. В области оптики старое противоречие между волновой и корпускулярной природой света было разрешено в первой половине XIX века, когда решающие успехи в решении проблемы распространения волн (Френель) позволили исследовать все следствия волновой гипотезы и объяснить на основании этой гипотезы всю совокупность известных световых явлений,

³⁾ Напомним, что число N молекул на один моль (число Авогадро) есть $N = 6,02 \cdot 10^{23}$. Первое точное определение числа N Лошмидтом (1865 г.) было основано на кинетической теории газов.

⁴⁾ Следует отметить, что во всех рассуждениях статистической механики присутствует гипотеза статистического характера, а именно — гипотеза молекулярного хаоса, от которой нельзя избавиться, оставаясь в рамках статистического метода. Хотя эта гипотеза и кажется интуитивно правильной, ее строгое доказательство (эргодическая теорема) оказалось особенно сложным и до сих пор не может считаться завершённым.

включая и геометрическую оптику. В то же время быстро развивалось изучение электрических и магнитных явлений. Решающим успехом в этой области мы обязаны Максвеллу, который в 1855 г. предложил основные уравнения электромагнитной теории; основываясь на этих уравнениях, он предсказал существование электромагнитных волн (это предсказание было наглядно подтверждено в дальнейшем открытием волн Герца) и доказал, что световая волна есть электромагнитная волна частного вида. Так произошел синтез оптики и электричества.

К концу XIX века успехи программы классической физики производили большое впечатление. Казалось, что все известные в природе физические явления находят свое объяснение в общей теории вещества и излучения; в тех же случаях, когда такое объяснение не было найдено, неудачу можно было приписать математическим трудностям, не ставя под сомнение справедливость самих основных уравнений. Особенно значительным успехом казалась достигнутая общность и универсальность теории. Стремление объединить различные области науки в единой теории всегда было наиболее плодотворным стремлением целых поколений физиков. Однако физики описываемой эпохи приписывали теории гораздо большую степень единства, чем она на самом деле обладала. Действительно, явление распространения волн отнюдь не является присущим только электромагнетизму. Исследования колебательных процессов были проведены вначале на примерах чисто материальных колебаний (колеблющиеся струны, волны на поверхности жидкости и т. д.), а волновой характер акустических явлений стал очевиден задолго до открытия световых волн. Распространение волн в веществе никак не противоречит корпускулярной теории: здесь дело идет о макроскопическом явлении, которое нетрудно объяснить с точки зрения микроскопического движения, если принять существование подходящих сил взаимодействия. По аналогии физики классической эпохи искали соответствующую среду для распространения электромагнитных волн, некоторый материальный флюид, получивший наименование эфира, структура и механические свойства которого оставались неясными. Таким образом, основной субстанцией оказывалось некоторое вещество, подчиняющееся законам механики Ньютона и наделенное такими силами взаимодействия, что в определенных условиях в этом веществе проявляются волновые процессы, частным случаем которых и являются электромагнитные волны.

Эта концепция (в дальнейшем полностью оставленная) в описываемую нами эпоху привела к постановке целой серии экспериментов, которые мало что дали для выяснения природы эфира, но один из них привел к революционному перевороту всей классической физики. Мы имеем в виду знаменитый опыт

Майкельсона — Морли (1887 г.), поставленный с целью обнаружить движение Земли относительно эфира по изменению скорости света в зависимости от направления этого движения. После ряда более или менее искусственных попыток объяснить отрицательный результат этого опыта парадокс был окончательно разрешен Эйнштейном в 1905 г. в рамках его *теории относительности*, которая явилась результатом критического анализа понятий пространства и времени и привела к отказу от понятия абсолютного времени и ряда положений механики Ньютона. Эта последняя оказалась только некоторым приближением в релятивистской механике, справедливым, когда скорости частиц малы по сравнению со скоростью света c . Мы не будем рассматривать принцип относительности, но вернемся к нему в конце этой книги, когда приступим к изучению релятивистской квантовой механики. Отметим здесь только, что принцип относительности не ставит под вопрос ни доктрину, ни программу классической физики, в том виде как они были сформулированы выше.

§ 3. Успехи в изучении микроскопических явлений и появление квантов в физике

На рубеже нового века усилия экспериментаторов были направлены на разрешение двух тесно связанных проблем: выяснения истинной микроскопической структуры вещества и законов взаимодействия материальных корпускул между собой и с электромагнитным полем.

Первые данные, касающиеся строения вещества, были получены при исследовании лучей, возникающих при электрических разрядах в разреженных газах, так называемых катодных и канальных лучей, которые в действительности оказались потоками электрически заряженных корпускул, движущихся с большей или меньшей скоростью. Так был открыт *электрон* (Дж. Дж. Томсон, 1897 г.) — частица катодного излучения; было изучено его поведение в присутствии электромагнитного поля и построена полная теория взаимодействия между электроном и электромагнитными волнами (теория электрона Лоренца)⁵).

Постепенно само существование атомов и молекул, которое долгое время рассматривалось только как удобная рабочая гипотеза, было осознано как объективная реальность. Наиболее убедительным доказательством явилось изучение броуновского движения — беспорядочного движения очень малых частиц, находящихся во взвешенном состоянии в жидкости или газе; это

⁵) Г. А. Лоренц, Теория электронов и ее применения к явлениям света и теплового излучения, ОНТИ, 1934; см. также L. Rosenfeld, Théorie des électrons, Paris, 1951.

движение возникает благодаря многочисленным беспорядочным столкновениям частиц с молекулами окружающей среды, оно как бы воспроизводит наглядно молекулярное движение и может быть количественно связано (Эйнштейн, Смолуховский, 1905 г.) со статистическими законами движения самих молекул среды.

Систематические измерения Перрена (1908 г.) подтвердили эту гипотезу и позволили произвести новые и согласующиеся между собой измерения числа Авогадро⁶⁾. После этого решающего успеха физики более не сомневались в существовании атомных и субатомных частиц. Были разработаны экспериментальные методы разной степени сложности, позволяющие наблюдать отдельные явления на микроскопическом уровне и считать отдельные микроскопические частицы (измерение элементарного заряда электрона Миллиkenом в 1910 г., первые наблюдения траекторий заряженных частиц в камере Вильсона в 1912 г., первый счетчик Гейгера в 1913 г.). Эти методы «прямого» наблюдения продолжали совершенствоваться в дальнейшем, они и в наше время составляют важную часть экспериментальной техники для изучения микроскопических явлений.

В то же время новая глава физики была открыта при обнаружении радиоактивности (1896 г.) — первого известного проявления свойств атомных ядер. Важное само по себе, это открытие дало в руки физиков мощное орудие исследования структуры атома, а именно — α -излучение, состоящее из ядер атомов гелия, движущихся с большой скоростью. Направляя α -излучение на различные мишени, Резерфорд (1911 г.) произвел систематическое исследование рассеяния α -частиц атомами и сумел таким путем построить первую современную модель атома.

Атом Резерфорда состоит из центрального ядра крайне малых размеров (10^{-13} — 10^{-12} см), вокруг которого движется некоторое число Z электронов. Почти вся масса атома сосредоточена в его ядре. Ядро обладает положительным электрическим зарядом Ze , который в точности компенсирует полный заряд совокупности электронов — Ze , так что в целом атом оказывается электрически нейтральным. Атом Резерфорда похож, таким образом, на солнечную систему в миниатюре, где гравитационные силы заменены на силы электромагнитные. Под действием этих сил — кулоновского притяжения со стороны ядра и кулоновского взаимного отталкивания — электроны движутся вокруг ядра по устойчивым орбитам, размеры которых порядка атомных размеров, т. е. 10^{-8} см.

⁶⁾ См. J. Perrin, Les Atomes, Paris, 1948.

Параллельно с упрочением корпускулярных представлений о строении вещества происходит углубление знаний об электромагнитном излучении. Спектр известных электромагнитных волн расширяется в направлении более коротких длин волн с открытием рентгеновских лучей (Рентген, 1895 г.), волновая природа которых устанавливается опытами по дифракции в кристаллах (фон Лауэ, 1912 г.). Для полноты упомянем еще о γ -излучении радиоактивных веществ, электромагнитная природа которого была установлена только значительно позже (на рис. 1 представлена полная шкала электромагнитного излучения различных длин волн). Совершенствуются методы спектрального анализа, позволяющие накопить большое количество информации относительно процессов испускания, рассеяния и поглощения света веществом, т. е. относительно взаимодействия между веществом и излучением на микроскопическом уровне. Уже упомянутая теория электронов Лоренца, т. е. теория заряженных частиц во взаимодействии с электромагнитным полем, позволяет в принципе объяснить все эти явления. Но именно в сравнении предсказаний этой теории с результатами эксперимента проявились первые противоречия между классической теорией и опытом.

Первые трудности возникли при изучении спектрального распределения электромагнитного излучения, находящегося в термодинамическом равновесии с веществом. Типичным примером является случай *абсолютно черного тела*; по определению — это тело, поглощающее все падающее на него излучение. Самые общие термодинамические рассуждения показывают, что излучение, испускаемое абсолютно черным телом, зависит только от температуры этого тела. Спектральное распределение интенсивности излучения абсолютно черного тела имеет, таким образом, всегда один и тот же вид и может быть выведено методами статистической термодинамики из общих законов взаимодействия между веществом и излучением. Формула, получаемая классической теорией, находится в резком противоречии с опытом. В 1900 г. Планку удалось устранить это противоречие, но ценой отказа от классического

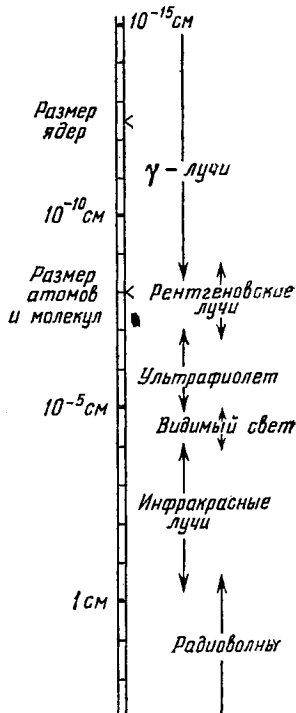


Рис. 1. Шкала длин волн электромагнитного излучения.

закона взаимодействия между веществом и излучением⁷⁾. Он выдвинул гипотезу о том, что обмен энергией между веществом и излучением происходит не непрерывным образом, а путем передачи дискретных и неделимых порций энергии, или *квантов энергии*. Планк показал, что квант энергии пропорционален частоте ν излучения

$$e_\nu = h\nu$$

и получил согласующееся с опытом выражение для спектрального распределения, выбирая соответствующим образом постоянную пропорциональности. Эта постоянная h с тех пор называется *постоянной Планка*. Она имеет размерность действия (энергия \times время или импульс \times длина). В дальнейшем мы будем использовать постоянную

$$h = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек.}$$

При появлении гипотезы Планка она казалась неприемлемой, подавляющее большинство физиков видело в ней только удобный математический прием, который в дальнейшем удастся объяснить на основе классической доктрины. Даже видимый успех теории Планка в объяснении результатов опыта не мог служить неопровержимым доказательством того, что обмен энергией между веществом и излучением действительно происходит квантами — закон распределения Планка есть макроскопический закон, полученный на основе гипотезы о квантах статистическими методами; он может служить лишь косвенным подтверждением гипотезы. Можно было поставить под сомнение квантовую гипотезу, подобно тому как многие годы из-за отсутствия прямых экспериментов на микроскопическом уровне вызывала сомнения гипотеза об атомном строении вещества. Однако гипотеза Планка была в дальнейшем подтверждена и дополнена целой серией опытов, позволивших анализировать элементарные процессы и доказать скачкообразность и прерывность эволюции физических систем на микроскопическом уровне, где классическая теория предсказывала непрерывную эволюцию.

Раздел II. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ, ИЛИ ФОТОНЫ

Первая серия экспериментальных фактов привела к радикальному пересмотру теории излучения Максвелла — Лоренца и частичному возврату к старой корпускулярной теории; имеются в виду *фотоэлектрический эффект* и *эффект Комптона*.

⁷⁾ Подробное изложение теории излучения абсолютно черного тела см. в книге М. Борна, цитированной на стр. 16.