

КВАНТЫ СВЕТА

* * *

§ 1. Энергия и импульс светового кванта

1. К середине 19-го века волновая природа света считалась доказанной окончательно. Ее подтверждали явления интерференции и дифракции света. А опыт Фуко (1819—1868), казалось, исключал всякую возможность корпускулярных представлений о свете (см. т. IV, § 3). Это действительно было бы так, если бы имелась в виду корпускулярная теория в ньютоновской форме (см. § 5).

Однако и волновая теория света, даже в ее электромагнитной форме, оказалась недостаточной для истолкования всей совокупности оптических явлений. Впервые это было осознано при рассмотрении проблемы *равновесного (черного) излучения*. Настойчивые попытки решить эту проблему в рамках волновых представлений на основе классических электродинамики и статистики закончились неудачей (см. т. IV, § 117). Формула, согласующаяся с опытом во всем диапазоне длин волн, была угадана Планком (1858—1947) в октябре 1900 г., сначала эмпирически. Немного позже Планк нашел и теоретический вывод своей формулы, доложенный им 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества. Это было исходным пунктом возникновения принципиально новых — *квантовых* — представлений. Сначала они касались только природы света, но затем постепенно проникли во все разделы физики.

Оказалось, что понятия и принципы классической физики, возникшие на основе изучения макроскопических объектов, не применимы или ограниченно применимы в области атомных и субатомных масштабов. В этой области потребовались новые представления и законы, которые в конце концов и были найдены. Они составили основу новой, так называемой *квантовой* физики. Однако излагать квантовую физику систематически и дедуктивно, полностью отвлекаясь от истории ее развития, как это делается в теоретической физике, в общей физике было бы нецелесообразно. Сначала надо ознакомить начинающего с основными опытными фактами, которые одни только и могут убедить его в недостаточности и ограниченной применимости классических представлений. Они же, и это главное, позволяют наметить пути для введения новых представлений. Именно такой метод изложения принят в настоящей книге, дающей элементарное введение в квантовую физику.

2. Вернемся, однако, к истокам квантовых идей. При выводе своей формулы для равновесного излучения Планк ввел чуждую классической физике гипотезу, что *излучение и поглощение света веществом происходит не непрерывно, а конечными порциями, или квантами*. Так как свойства равновесного излучения в полости не зависят от вещества стенок полости, вещество без ограничения общности он рассматривал как совокупность гармонических осцилляторов. А чтобы согласовать свою гипотезу с законами термодинамики и электродинамики, Планк принял, что энергия кванта \mathcal{E} , излучаемая или поглощаемая гармоническим осциллятором частоты ν , определяется выражением

$$\mathcal{E} = h\nu, \quad (1.1)$$

где h — универсальная постоянная, получившая название *постоянной Планка* (см. т. IV, § 118). Её значение было вычислено самим Планком из экспериментальных результатов, полученных при изучении распределения энергии в спектре излучения *абсолютно черного тела*. Однако постоянная Планка, как и всякая фундаментальная постоянная, входит в множество других физических явлений. Все они дают независимые способы определения этой постоянной и в пределах ошибок измерений приводят к согласующимся результатам. По современным данным

$$h = 6,626176(36) \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}^1). \quad (1.2)$$

В некоторых вопросах, в особенности в теоретической физике, более удобна постоянная

$$\hbar = 1,0545887(57) \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}, \quad (1.3)$$

введенная Дираком (1902—1984). Её также называют *постоянной Планка — перечеркнутой* или *дираковой*. Через эту постоянную энергия кванта излучения выражается формулой

$$\mathcal{E} = \hbar\omega, \quad (1.4)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ — *циклическая частота излучения*. Мы будем пользоваться как выражением (1.1), так и выражением (1.4).

3. Сам Планк, как видно из изложенного, полагал, что квантовые свойства света проявляются только в *актах излучения и поглощения*, т. е. при *взаимодействии света с веществом*. Распространение же света в пространстве, по его воззрениям, происходит *непрерывно* и описывается классическими уравнениями Максвелла (1831—1879). Более радикальная и законченная форма была придана квантовой теории света Эйнштейном (1879—1955) в 1905 г. Руководствуясь некоторыми теоретиче-

¹⁾ Здесь, как и всюду в дальнейшем, в скобках приведено стандартное отклонение последних двух цифр от их среднего значения.

скими соображениями и экспериментальными фактами, Эйнштейн пришел к представлению, что и *при распространении в пространстве свет ведет себя подобно совокупности каких-то частиц*, причем энергия каждой частицы определяется формулой Планка (1.1) или (1.4). Такие частицы позднее получили название *квантов света или фотонов*.

Это не было простым возвратом к ньютоновской корпускулярной теории света. Нельзя смотреть на фотоны как на обычные частицы света, аналогичные материальным точкам классической механики и движущиеся по определенным траекториям в пространстве. Это видно уже из того, что фотонам свойственна *интерференция и дифракция*. Они обладают не только корпускулярными, но и *волновыми свойствами*. Такая особенность фотонов называется *корпускулярно-волновым дуализмом*. Было бы безнадежно пытаться истолковать корпускулярно-волновой дуализм в духе представлений классической физики. Человеческое воображение не в состоянии создать образ, обладающий одновременно и свойствами корпускулы, и свойствами волны. Однако природа богаче воображения человека. При ее изучении надо руководствоваться не тем, что доступно воображению человека, а тем, что дают наблюдения и опыт. Отметим уже сейчас, что обычные корпускулы — электроны, нейтроны, атомы, молекулы и пр. — также обладают волновыми свойствами. Опыты, заставляющие принять это заключение, будут рассмотрены в § 18. Поэтому обсуждение вопроса, как современная физика истолковывает корпускулярно-волновой дуализм, мы отложим до § 19, после того как будут изучены волновые свойства вещества.

4. Если фотон обладает энергией, то он должен обладать и импульсом, как этого требует теория относительности. Импульс фотона проявляется, например, в давлении света. Связь между энергией \mathcal{E} и импульсом p при движении частицы в теории относительности выражается формулой

$$(\mathcal{E}/c)^2 - p^2 = (m_0 c)^2 \quad (1.5)$$

(см. т. IV, § 111). (При этом предполагается, что во время движения внутреннее состояние частицы, а с ним и ее масса покоя m_0 остаются без изменения.) Фотон движется в вакууме со скоростью света c , т. е. является *релятивистской частицей*. Если бы масса покоя фотона m_0 была отлична от нуля, то его релятивистская масса

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

была бы бесконечно велика. Поэтому надо допустить, что для фотона $m_0 = 0$. В результате предыдущее соотношение запишется в виде

$$\mathcal{E} = pc. \quad (1.6)$$

(Знак минус при извлечении квадратного корня следует опустить, принимая, что импульс фотона p направлен в сторону распространения света.)

Неклассический характер соотношения (1.1) или (1.4) проявляется, между прочим, в том, что по классическим представлениям энергия должна быть связана не с частотой, а с *амплитудой* колебания. По этим представлениям корпускулярно-волнового дуализма не должно быть. Но если такой дуализм все же существует, то связь между корпускулярными и волновыми свойствами излучения не может ограничиваться соотношением (1.1) или (1.4). Корпускулярные свойства излучения характеризуются *энергией* \mathcal{E} и *импульсом* p , волновые — *частотой* ω и волновым вектором k . В теории относительности величины \mathcal{E} и p объединяются в один *четырехмерный вектор энергии-импульса* (\mathcal{E}, cp) . Фаза волны $\omega t - kr$, как показано в т. IV, § 107, *инвариантна относительно преобразования Лорентца*. А так как $(t, r/c)$ — четырехмерный вектор, то отсюда следует, что частота ω и волновой вектор k также объединяются в *четырехмерный вектор* (ω, ck) . Временные компоненты \mathcal{E} и ω четырехмерных векторов (\mathcal{E}, cp) и (ω, ck) одинаково преобразуются при преобразованиях Лорентца. Поэтому соотношение (1.1) (или (1.4)) удовлетворяет необходимому требованию *релятивистской инвариантности*. Но релятивистски инвариантное соотношение не может ограничиться связью только между временными компонентами четырехмерных векторов (\mathcal{E}, cp) и (ω, ck) . Связь должна существовать между самими *четырехмерными векторами*. Отсюда следует, что если гипотеза Планка $\mathcal{E} = \hbar\omega$ верна, то из нее и из требования релятивистской инвариантности с неизбежностью вытекает, что $p = \hbar k$. Поэтому мы в качестве гипотезы принимаем, что

$$\mathcal{E} = \hbar\omega, \quad p = \hbar k. \quad (1.7)$$

При этом для фотона $\mathcal{E}^2 - (pc)^2 = (m_0c^2)^2 = 0$, т. е. обращение в нуль массы покоя фотона m_0 эквивалентно утверждению, что для фотона четырехмерный вектор энергии-импульса (\mathcal{E}, cp) является световым вектором.

5. При взаимодействии с веществом фотоны могут испускаться, поглощаться и рассеиваться. Сохранение числа фотонов не имеет места. Зато должны выполняться *законы сохранения энергии и импульса*.

Свободный электрон может только рассеять, но не испустить или поглотить фотон. Чтобы показать это простейшим способом, воспользуемся системой отсчета, в которой электрон первоначально покоялся. Пусть электрон испустил фотон с импульсом p_ϕ и энергией \mathcal{E}_ϕ . Обозначим импульс электрона после испускания через p_ϕ , а энергию — через \mathcal{E}_ϕ . Из законов сохране-

ния импульса и энергии следует

$$p_{\phi} + p_{\Phi} = 0, \quad \mathcal{E}_{\phi} + \mathcal{E}_{\Phi} = m_0 c^2,$$

где m_0 — масса покоя электрона. Отсюда

$$(cp_{\phi})^2 = (cp_{\Phi})^2, \quad \mathcal{E}_{\phi}^2 = \mathcal{E}_{\Phi}^2 - 2\mathcal{E}_{\Phi}m_0c^2 + (m_0c^2)^2.$$

Вычтем первое равенство из второго. Тогда с учетом соотношения (1.6) для фотона и соотношения (1.5) для электрона получим

$$\mathcal{E}_{\Phi}m_0c^2 = 0.$$

Отсюда следует $\mathcal{E}_{\Phi} = 0$, т. е. испускание невозможно. Таким же рассуждением убеждаемся, что невозможно и поглощение.

Полученный результат в известном смысле тривиален. Доказательство молчаливо предполагало, что масса покоя электрона до испускания равна его массе покоя после испускания. Это значит, что *внутреннее состояние электрона в результате испускания не изменилось*. В таком случае полная энергия электрона может только возрастать за счет кинетической энергии, получаемой электроном при отдаче во время испускания. Испущенный фотон в свою очередь несет положительную энергию. Если бы испускание было возможно, то оно сопровождалось бы нарушением закона сохранения энергии.

В заключение несколько слов об обозначениях. В физике элементарных частиц под массой частицы принято понимать *массу покоя* и обозначать ее через m (опуская нуль в индексе). Однако, поскольку наряду с массой покоя нам придется пользоваться и релятивистской массой, мы сохраним для этих величин стандартные обозначения m_e и m . Это в особенности будет делаться тогда, когда конкретный вид частицы не играет роли. Там же, где речь идет об электронах, протонах, нейтронах и других элементарных частицах, под m_e , m_p , m_n , ... мы будем понимать их массы покоя. Часто в общих рассуждениях массу покоя удобно обозначать через m_0 , чтобы отличить ее от релятивистской массы m . В окончательных же результатах m_0 целесообразно заменить на m_e , m_p , m_n , ..., чтобы явно указать, о массе покоя какой частицы идет речь.

ЗАДАЧИ

1. Определить длину волны λ_K , при которой энергия светового кванта равна энергии покоя электрона. Такая длина волны называется *комптоновской длиной* для электрона (см. § 3).

Ответ. $\lambda_K = h/m_0 c \approx 2,43 \cdot 10^{-11}$ см, где m_0 — масса покоя электрона.

2. Определить релятивистскую массу m светового кванта с длиной волны λ .

Ответ. $m = (\lambda_K/\lambda) m_0$.

3. Если бы фотон обладал массой покоя m_{ϕ} , то скорость света в вакууме должна была бы зависеть от длины волны. Исследуя экспериментально

этую зависимость, можно было бы оценить нижний предел для массы фотона. Найти выражения для фазовой и групповой скорости света в вакууме в предположении, что $m_\Phi \neq 0$.

Решение. Энергия фотона $\hbar\omega$ и его импульс $\hbar k$ связаны соотношением

$$(\hbar\omega)^2 - (c\hbar k)^2 = (m_\Phi c^2)^2, \quad (1.8)$$

где, разумеется, под c следует понимать уже не скорость света в вакууме, а некоторую фундаментальную скорость, входящую в теорию относительности. Из уравнения (1.8) и определятся фазовая скорость света в вакууме $v = \omega/k$:

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{m_\Phi c^2}{\hbar\omega} \right)^2} \approx \frac{1}{c} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m_\Phi c^2}{\hbar\omega} \right)^2 \right]. \quad (1.9)$$

На опыте измеряется не фазовая, а групповая скорость света. Для нее из формулы (1.8) получается

$$u = d\omega/dk = c^2 (k/\omega) = c^2/v, \quad (1.10)$$

или

$$u = c \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m_\Phi c^2}{\hbar\omega} \right)^2 \right] = c \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{c\lambda}{h} m_\Phi \right)^2 \right]. \quad (1.11)$$

Современные радиолокационные методы измерения скорости света при различных частотах приводят к результату $m_\Phi < 4 \cdot 10^{-21} m_e$, где m_e — масса электрона.

§ 2. Фотоэлектрический эффект

1. Одним из явлений, подтверждающих гипотезу фотонов, является **фотоэлектрический эффект**, к рассмотрению которого мы и перейдем.

В 1887 г. Генрих Герц (1857—1894) обнаружил, что освещение ультрафиолетовым светом *отрицательного электрода* искрового промежутка, находящегося под напряжением, облегчает проскакивание искры между его электродами. Занятый в то время исследованиями электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом, Герц не обратил на это явление серьезного внимания. Первые исследования явления принадлежат Хальваксу (1859—1922), Риги (1850—1921) и в особенности А. Г. Столетову (1839—1896).

Сущность явления, обнаруженного Герцем, состоит в том, что *при освещении ультрафиолетовыми лучами отрицательно заряженного металлического тела оно теряет отрицательный заряд*. При освещении такими же лучами положительно заряженного тела потери заряда не наблюдаются. Более того, если тело не было заряжено, то при освещении оно заряжается *положительно* до потенциала в несколько вольт. После открытия электрона в 1897 г. Дж. Дж. Томсоном (1856—1940) опытами самого Томсона, а также Ленарда (1862—1947) вскоре был найден удельный заряд e/m для частиц, теряемых телами при освещении. Он оказался таким же, как и для частиц катодных