

5 КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

5.1. Корпускулярно-волновой дуализм

5.1.1. Гипотеза М. Планка о квантах



Попытка объяснить излучение нагретых до высокой температуры тел, опираясь на законы электромагнетизма, приводила к противоречию с экспериментальными фактами. Согласно данной теории нагретое тело должно излучать электромагнитные волны и, теряя энергию, охладиться до абсолютного нуля. В 1900 г. немецкий физик М. Планк разработал теорию теплового излучения абсолютно черного тела.

► Гипотеза Планка

Атомы испускают и поглощают электромагнитную энергию (свет) не непрерывно, а отдельными порциями — квантами.

Энергия каждой порции пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu,$$

где h — постоянная Планка,
 $h = 6,626176(36) \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Чаще пользуются постоянной

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0545887(57) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

также называемой постоянной Планка.



5.1.2. Фотоэффект

Фотоэффект — испускание электронов веществом при поглощении им квантов электромагнитного излучения (фотонов).



▶ Виды фотоэффекта:

1. Внешний.
2. Внутренний.

Внешний фотоэффект — это испускание электронов из вещества за его пределы.

Внутренний фотоэффект — это вырывание электронов из атомов, молекул или ионов, которые остаются внутри вещества.

5

5.1.3. Опыты А. Г. Столетова

Схема опытов Столетова по наблюдению фотоэффекта представлена на рис. 5.1.



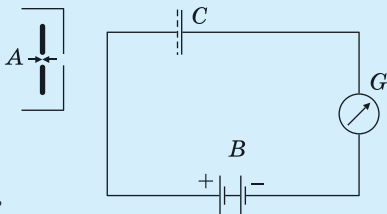
C — два металлических диска, установленных параллельно друг другу (один — латунная или железная металлическая сетка, второй диск — сплошной);

B — гальваническая батарея;

G — чувствительный гальванометр с большим сопротивлением (5 212 Ом);

A — источник света (лампа с вольтовой дугой)

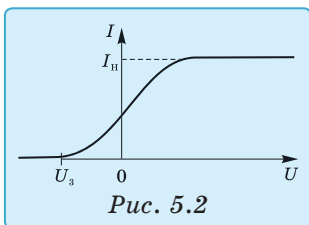
Рис. 5.1





Две металлические пластины представляют собой конденсатор, причем металлическая сетка является положительной обкладкой конденсатора. Свет от дуги А через сетку попадает на отрицательно заряженную сплошную металлическую пластину, а в цепи возникает фототок.

При изучении фотоэффекта строят зависимость тока I от напряжения U , подаваемого к электродам, один из которых (исследуемый фотокатод) освещается светом.



Из полученной зависимости $I(U)$ следует, что при $U = 0$ ток не равен нулю, а для того, чтобы он стал равным нулю, необходимо подать некоторое напряжение обратной

полярности, которое называется задерживающим напряжением U_3 и определяется максимальной кинетической энергией вылетающих электронов:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

► Законы фотоэффекта

1. Количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.
2. Скорость электронов, вылетающих из тела при фотоэффекте, определяется его частотой и не зависит от интенсивности.



3. Для каждого вещества существует предельная наименьшая частота света ν_{\min} (красная граница фотоэффекта), при которой возможен фотоэффект.

5.1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта



5

Если фотон передает электрону энергию, большую или равную величине работы по удалению электрона с поверхности металла, то электрон покидает поверхность этого металла.

Кинетическая энергия электрона имеет линейную зависимость от частоты и не зависит от интенсивности излучения. Поскольку общее число электронов, покидающих поверхность металла, пропорционально числу падающих фотонов, то количество вырванных электронов пропорционально интенсивности падающего излучения.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

где $h\nu$ — энергия фотона; A — работа по удалению электрона с поверхности вещества;

$\frac{mv^2}{2}$ — кинетическая энергия электрона.

Красная граница фотоэффекта:

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}, \quad \lambda_{\min} = \frac{ch}{A}.$$

Красная граница фотоэффекта зависит только от работы выхода A .



5.1.5. Фотоны

Фотон — элементарная частица, квант электромагнитного излучения.

При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией, зависящей от частоты.

Эти свойства света были названы корпускулярными, а сама частица — фотоном.



Фотон лишен массы покоя, он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу имеет скорость c .

Масса покоя фотона: $m_0 = 0$.

5.1.6. Энергия фотона

Энергия фотона:

$$E = h\nu.$$

Ее часто выражают через циклическую частоту:

$$E = h\nu = \hbar\omega.$$

Например, длина световой волны — 600 нм. Энергия фотона:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Релятивистская масса m_p фотона (масса движущегося фотона):

$$m_p = \frac{h\nu}{c^2}.$$





5.1.7. Импульс фотона

Импульс фотона:

$$p = m_p c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Импульс фотона: $p = \frac{h}{\lambda}$.

Релятивистская масса фотона: $m_p = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$.

Например, длина световой волны 600 нм. Импульс фотона равен:

$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 1,1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

Его релятивистская масса равна:

$$m_p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 3,7 \cdot 10^{-36} \text{ кг}.$$



5.1.8. Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц. Корпускулярно-волновой дуализм

▶ Корпускулярно-волновой дуализм

Всем микрообъектам присущи одновременно и корпускулярные, и волновые характеристики.

Фотоны — особые микрочастицы, энергия и импульс которых (в отличие от обычных материальных точек) выражаются через частоту и длину волны.

▶ Гипотеза де Бройля

Корпускулярно-волновой дуализм присущ всем без исключения видам материи: электронам, протонам, атомам.





Количественные соотношения между волновыми и корпускулярными свойствами частиц:

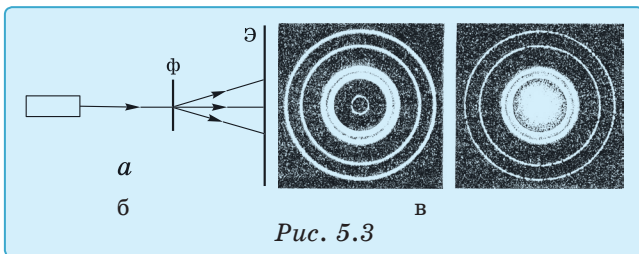
$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad v = \frac{E}{h}.$$

Длина волны де Бройля тем меньше, чем больше масса частицы и ее скорость. Поэтому волновые свойства несущественны в механике макроскопических тел, что полностью согласуется с принципом соответствия.

5.1.9. Дифракция электронов



Когда пучок электронов, движущихся с большой скоростью, направляется на тонкую фольгу Φ (рис. 5.3, а) и, пройдя фольгу, попадает на люминесцирующий экран \mathcal{E} , то на экране высвечиваются четкие дифракционные кольца (рис. 5.3, б).



Волновые свойства присущи и отдельному электрону, и пучку электронов.

Была обнаружена также дифракция протонов, нейтронов, атомных и молекулярных пучков. Дифракция электронов является экспериментальным подтверждением гипотезы де Бройля.