

Концепции и модели физики

Кузьмичев Сергей Дмитриевич



Содержание лекции №7

1. Частицы или волны?
2. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна.
3. Фотоны. Энергия и импульс фотона.
4. Эффект Комптона.
5. Корпускулярно-волновой дуализм.

Кто вы, мистер СВЕТ?

Корпускулярная теория света (Ньютон): свет состоит из мельчайших **частиц** (корпускул), испускаемых светящимися телами.

Частицы практически не взаимодействуют друг с другом. Отражение и преломление объясняется силами притяжения и отталкивания, действующими на световые корпускулы в приграничном слое вблизи границы раздела сред, на которую падает свет.

«Приступы» лёгкого отражения и лёгкого прохождения.
Трудности корпускулярной теории: объяснение интерференционных и дифракционных явлений.

Дискретность вещества → атомы, электроны.

Кто вы, мистер СВЕТ?

Волновая теория света (Гюйгенс, Френель): свет представляет собой **волны**, распространяющиеся в мировом эфире, заполняющем все мировое пространство и промежутки между частицами вещества.

Принцип суперпозиции волн.

Отражение и преломление волн.

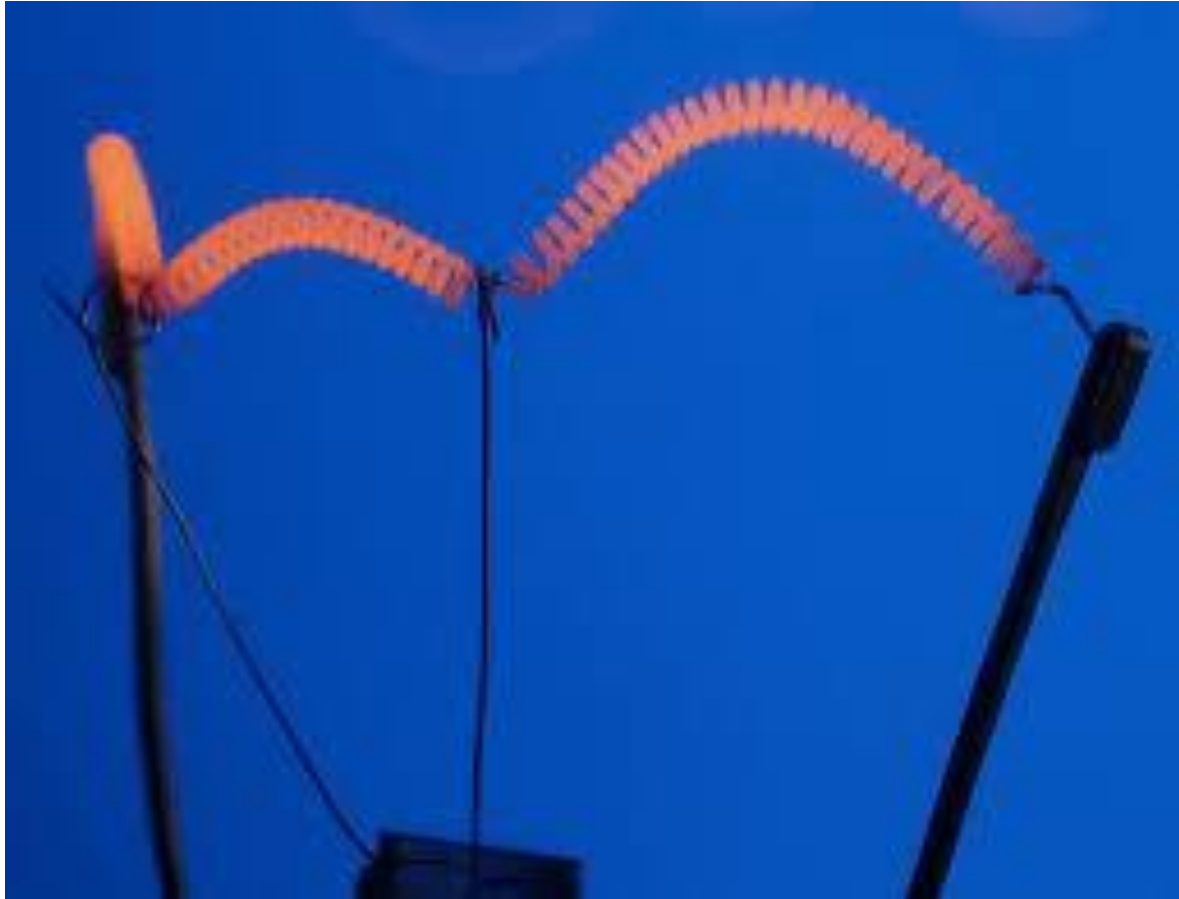
Интерференция. Дифракция. Поляризационные явления.

Электромагнитная теория Максвелла.

Определение скорости света, длины световой волны, световое давление.

Трудности волновой теории: объяснение спектра теплового излучения тел, фотоэлектрический эффект.

Излучение нагретых тел



Какой предмет называют чёрным?



Тепловое излучение

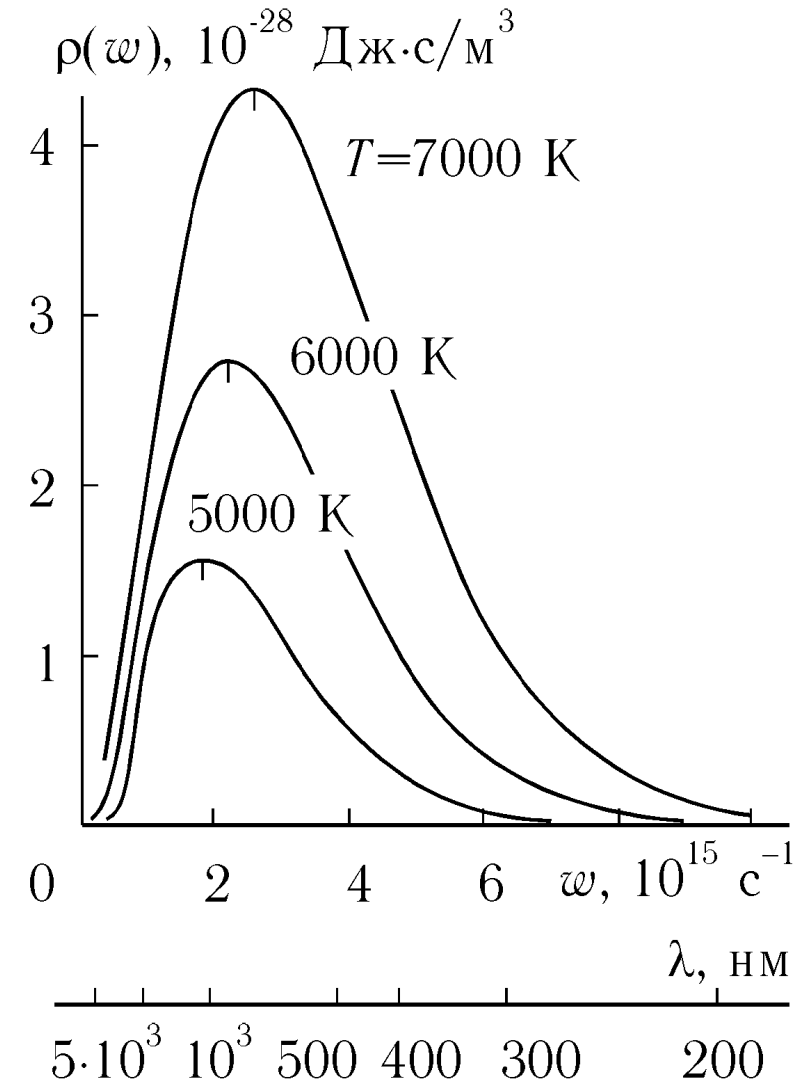
Равновесное тепловое излучение — электромагнитное излучение, испускаемое телом, находящимся в состоянии термодинамического равновесия.

Абсолютно чёрное тело.

Спектральная плотность объёмной плотности энергии теплового излучения (теория Релея-Джинса):

$$\rho(\omega) \simeq \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT$$

Ультрафиолетовая «катастрофа»,
несовпадение с экспериментом.



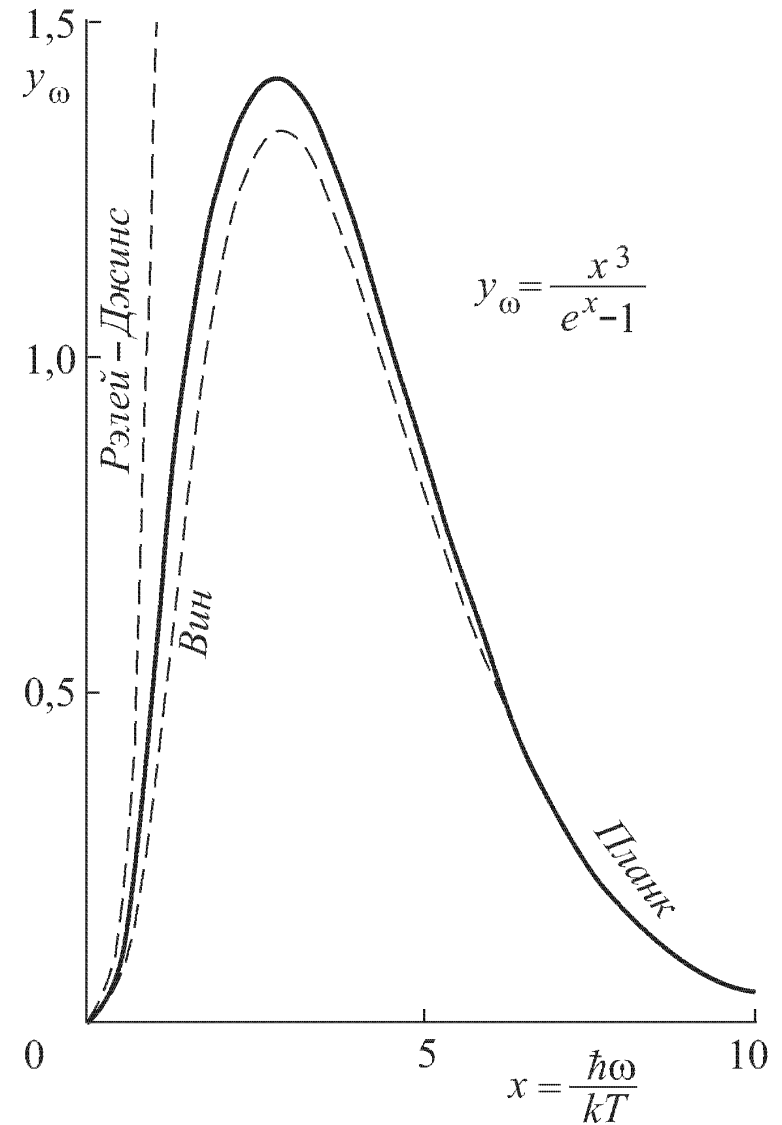
Тепловое излучение

Гипотеза Планка: излучение и поглощение света веществом происходит не непрерывно, а *конечными порциями*, называемыми **квантами** света или квантами энергии.

$$\rho(\omega) = \frac{k^3 T^3}{\hbar^2 \pi^2 c^3} \cdot \frac{x^3}{e^x - 1}, \quad x = \frac{\hbar \omega}{kT}$$

$$E = h\nu, \quad h = 2\pi\hbar$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$



Фотоэффект

Фотоэффект – испускание веществом электронов под действием падающего на него света.

Эксперименты:

1887 г. – Г. Герц (ускорение разрядки цинковых шариков при облучении ультрафиолетовым светом)

1888-1890 г. – А.Г. Столетов (заряд испускаемых частиц – отрицательный, ультрафиолет)

1898 г. – Ф. Ленард (вылетающие при фотоэффекте частицы – электроны)

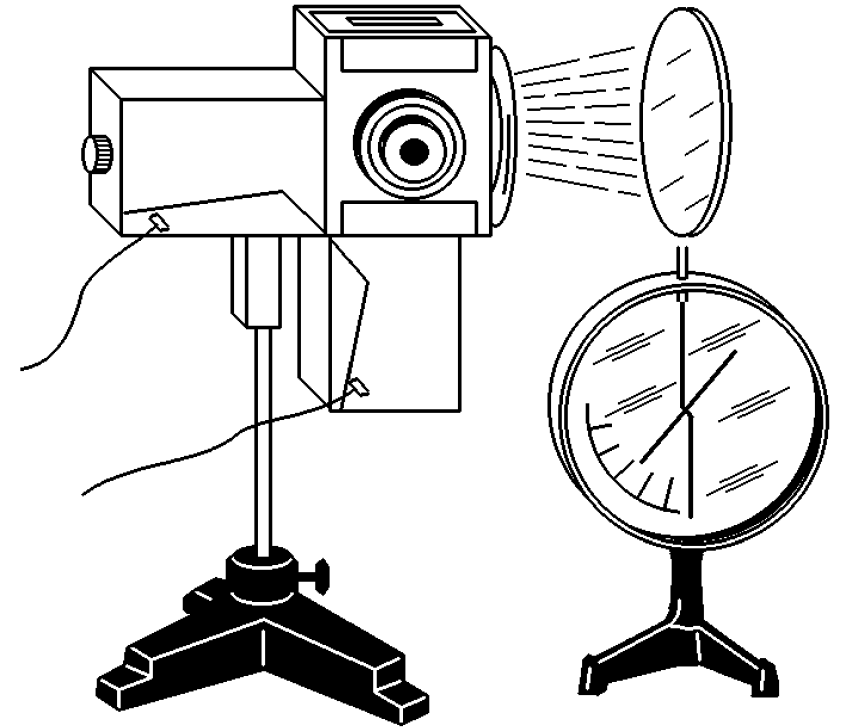
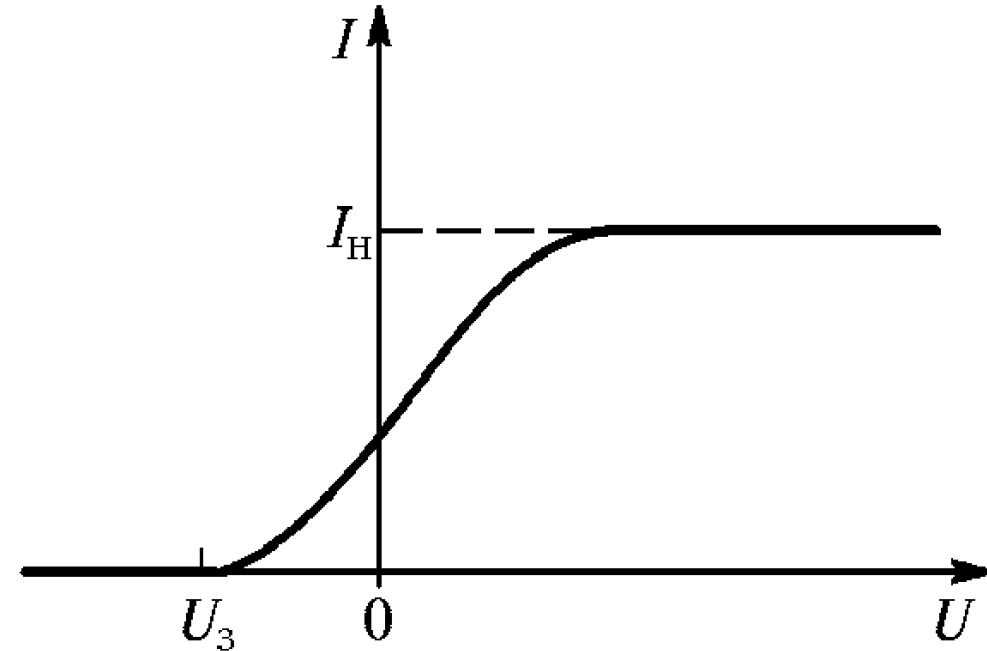
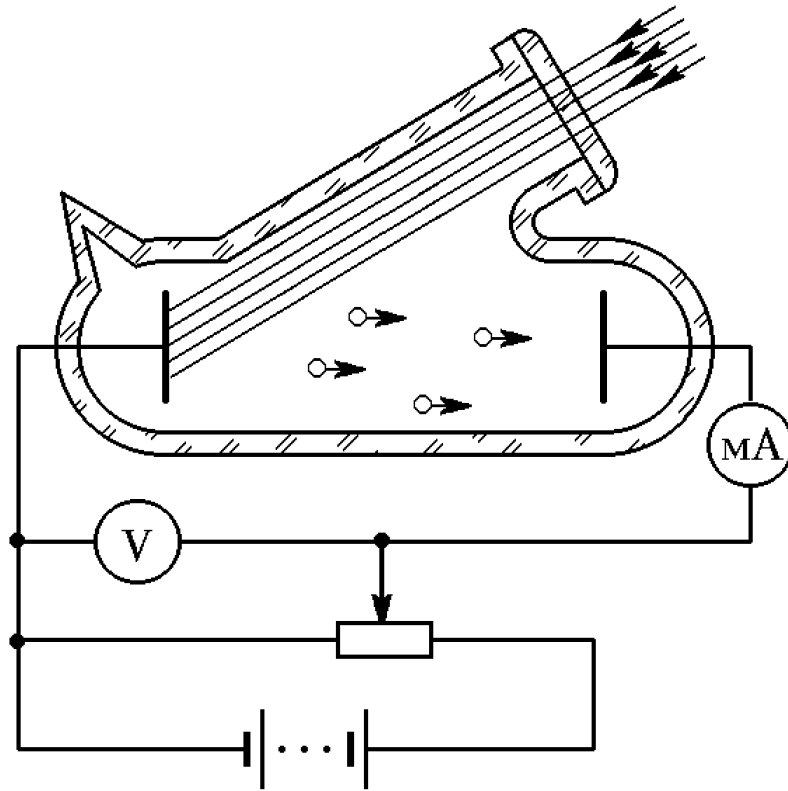
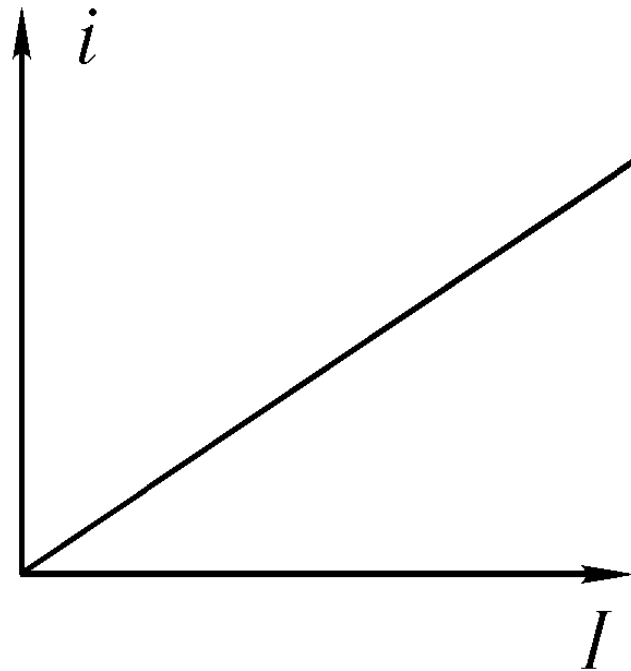
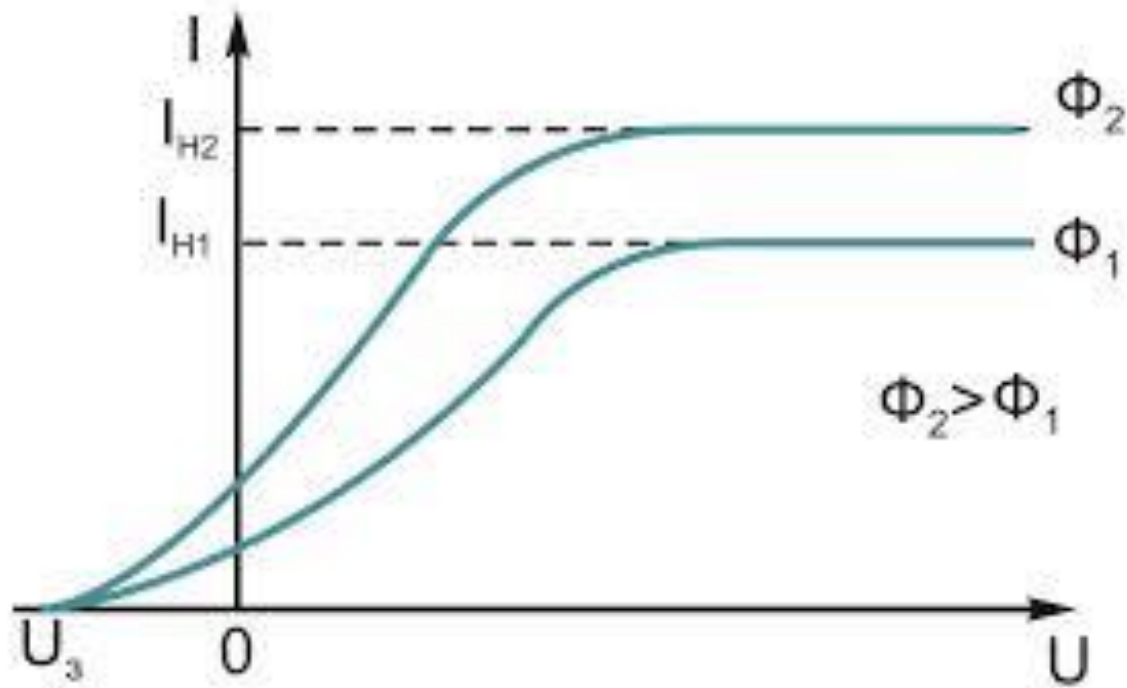


Схема установки по исследованию фотоэффекта



Получение вольт-амперной характеристики вакуумной лампы при облучении «холодного» катода светом *фиксированной* частоты.

Закономерности фотоэффекта



Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности света.

Величина запирающего напряжения не зависит от интенсивности света, но линейно зависит от его частоты.

Существует «красная граница» фотоэффекта.

Модель фотоэффекта

$$\frac{1}{2} m v_{\text{макс}}^2 = e V_3$$

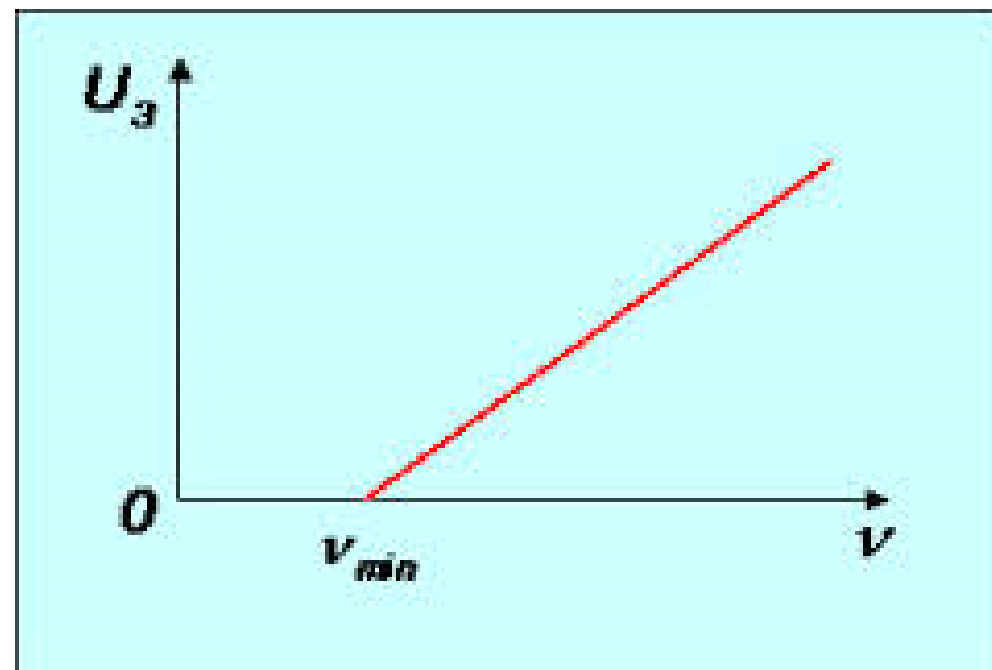
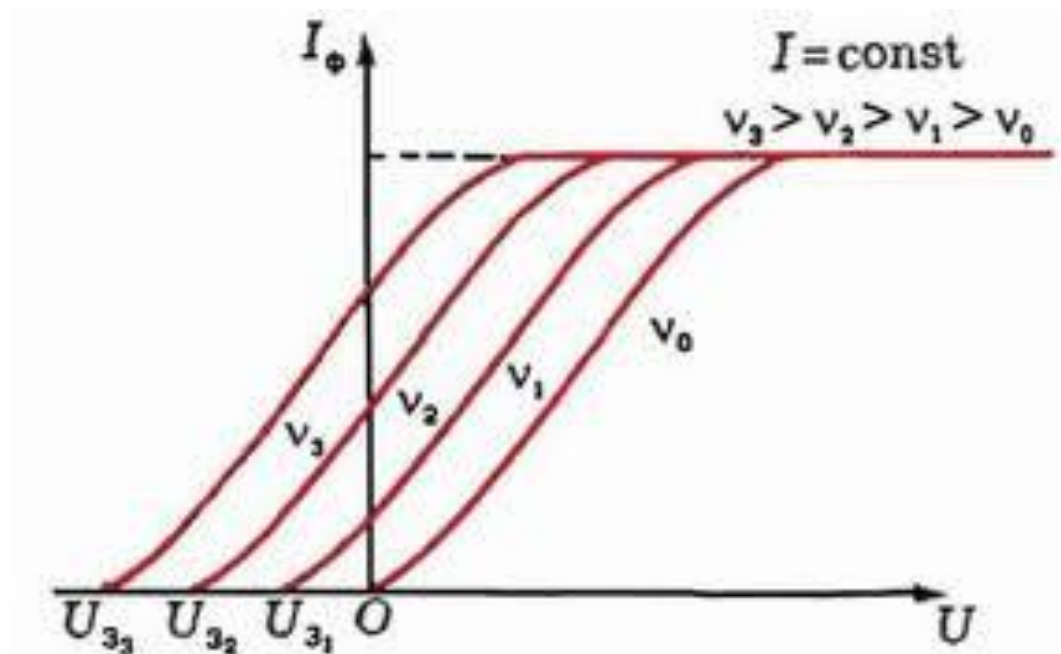
$$W = \frac{1}{2} m v_{\text{макс}}^2 + A_{\text{вых}} = e V_3 + A_{\text{вых}}$$

Энергия W не зависит от интенсивности падающего света. Её значение линейно растёт с ростом частоты падающего света.

Запирающее напряжение линейно зависит от частоты света.

Фотоэффект является практически безынерционным.

Законы фотоэффекта



Значение запирающего напряжения для выбранного материала катода линейно зависит от частоты падающего излучения. Существует «красная граница» фотоэффекта – минимальная частота, при которой фотоэффект возможен.

Основные экспериментальные данные по фотоэффекту:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит интенсивности света.
2. Для *каждого* вещества существует длинноволновая красная граница фотоэффекта: фотоэффект не наблюдается при длинах волн $\lambda > \lambda_{кр}$ ни при каких интенсивностях света.
3. Количество электронов, вырываемых светом из металла в единицу времени, прямо пропорционально интенсивности световой волны.
4. Фотоэффект практически безынерционен: фототок возникает практически мгновенно после облучения катода (при условии, что $\lambda < \lambda_{кр}$)

Невозможно объяснить все закономерности фотоэффекта на основе законов классической физики.

Эйнштейновская теория фотоэффекта

- Энергия электромагнитной волны частоты ν имеет дискретную структуру и состоит из отдельных порций энергии (квантов), величина которой равна $h\nu$.
- Свет представляет собой поток частиц - квантов или фотонов.
- Фотоны могут поглощаться и излучаться веществом.
- Фотоэффект — результат взаимодействия фотонов с электронами вещества.

Уравнение Эйнштейн для фотоэффекта

$$W = \frac{1}{2} m v_{\text{макс}}^2 + A_{\text{вых}} = e V_3 + A_{\text{вых}} = h \nu, \quad V_3 > 0$$

$$\frac{1}{2} m v_{\text{макс}}^2 = W - A_{\text{вых}} = h \nu - A_{\text{вых}} > 0$$

$$A_{\text{вых}} = h \nu_{\text{кр}}$$

Численные примеры

$$Si : A_{\text{вых}} = 4,6 \text{ эВ}, \quad 1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} = 1,11 \cdot 10^{15} \text{ Гц}, \quad \lambda_{\text{кр}} = \frac{c}{\nu_{\text{кр}}} = 270 \text{ нм}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = 100 \text{ нм}, \quad h\nu = 12,4 \text{ эВ}$$

$$\frac{1}{2} m v_{\text{макс}}^2 = h\nu - A_{\text{вых}} = 7,8 \text{ эВ}, \quad v_{\text{макс}} \approx 1,7 \cdot 10^6 \text{ м / с}$$

ФОТОНЫ. Энергия и импульс светового кванта.

$$E_{\text{фотона}} = h\nu$$

$$E^2 = (mc^2)^2 + p^2c^2, \quad v = \frac{pc^2}{E}$$

$$v_{\text{фотона}} = c, \quad m = 0, \quad m_{\text{фотона}}c^2 < 10^{-27} \text{ эВ}$$

$$E_{\text{фотона}} = pc$$

$$p = \frac{E_{\text{фотона}}}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\vec{p} = \hbar\vec{k}, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



Процессы с участием фотонов

$$h\nu + E = h\nu' + E',$$

$$\hbar\vec{k} + \vec{p} = \hbar\vec{k}' + \vec{p}'$$

Поглощение фотонов \rightarrow

Испускание \rightarrow

Рассеяние фотонов \rightarrow

Рождение и уничтожение фотонов.

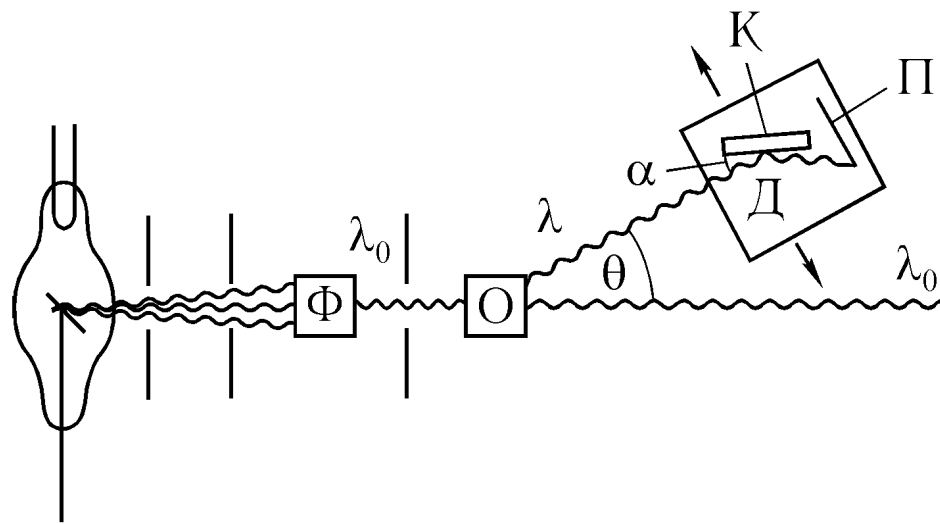
Может ли покоящийся электрон поглотить фотон?

$$h\nu + mc^2 = E', \quad \hbar\vec{k} = \vec{p}'$$

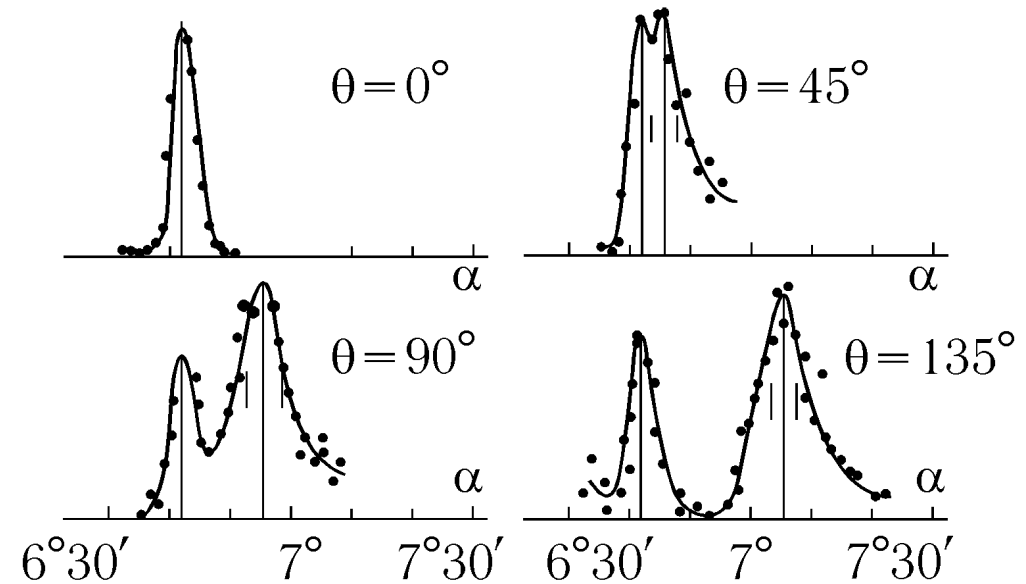
$$(E')^2 - (p'c)^2 = (mc^2)^2$$

$$(h\nu + mc^2)^2 - (h\nu)^2 = 2h\nu \cdot mc^2 + (mc^2)^2 \neq (mc^2)^2 \quad \nu \neq 0$$

Опыты Комптона по изучению рассеяния рентгеновских лучей на веществе



a



б

В спектре рассеянного излучения кроме излучения с длиной волны равной длине волны λ_0 падающего излучения наблюдалось излучение с длиной волны $\lambda > \lambda_0$, что противоречило классической теории рассеяния.

Теория эффекта Комптона

$$\hbar\omega_0 + mc^2 = \hbar\omega' + E', \quad \hbar\vec{k}_0 = \hbar\vec{k} + \vec{p}', \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} c, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$\hbar\omega(\hbar\omega_0 + mc^2) = mc^2\hbar\omega_0 + c^2 \frac{\hbar\omega_0}{c} \frac{\hbar\omega}{c} \cos\theta$$

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 + (\hbar\omega_0 / mc^2)(1 - \cos\theta)}$$

Теория эффекта Комптона

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 + (\hbar\omega_0 / mc^2)(1 - \cos\theta)}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}, \quad \omega = \frac{2\pi c}{\lambda},$$

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\theta) = \lambda_0 + \Lambda(1 - \cos\theta),$$

$$\Lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc} \approx 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ см}$$



Корпускулярно-волновой дуализм света

Волновые свойства света проявляют себя при интерференции, дифракции, поляризации (в основном большие длины волн).

При взаимодействии света с веществом (фотоэффект, эффект Комптона) проявляются корпускулярные свойства света.

Двойственная природа света: фотон обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

Корпускулярно-волновой дуализм – характерное свойство для всех микрообъектов.