

# 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.

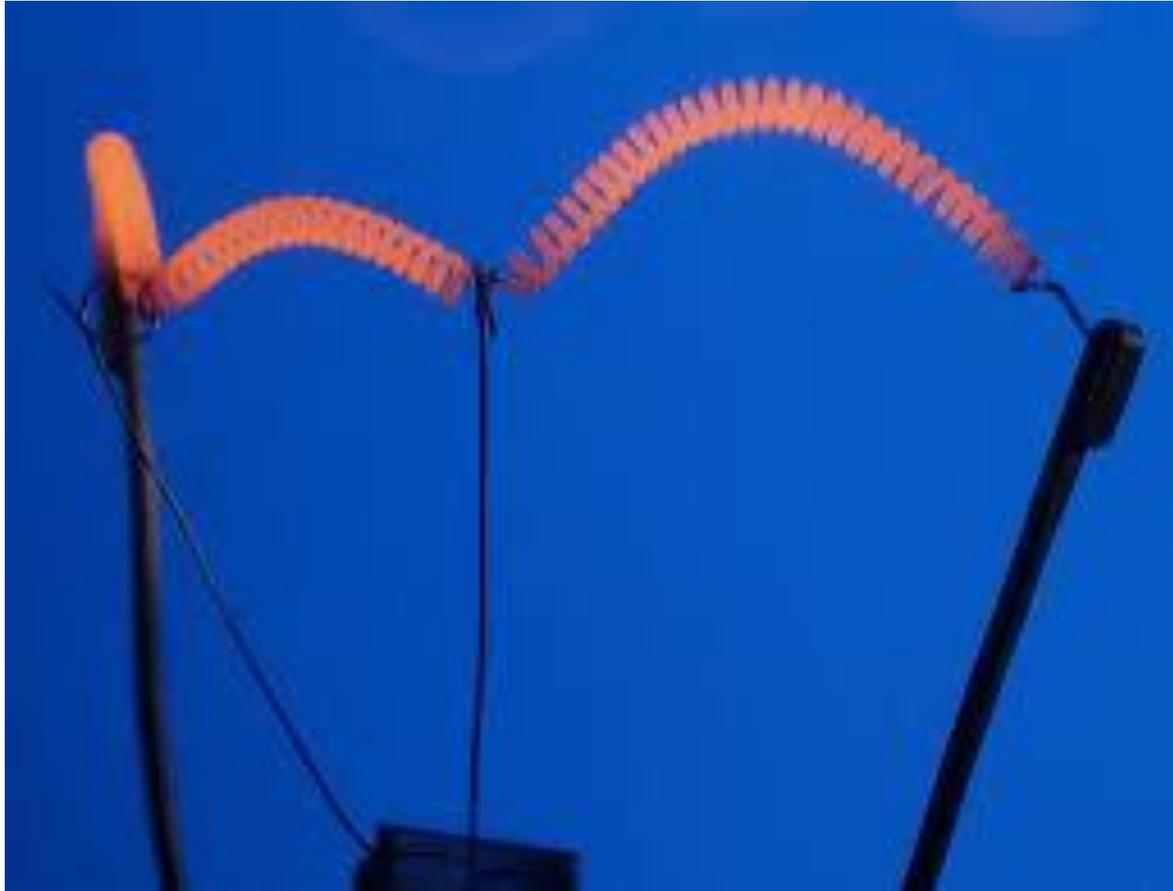
Интерференция. Дифракция. Поляризационные явления.

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

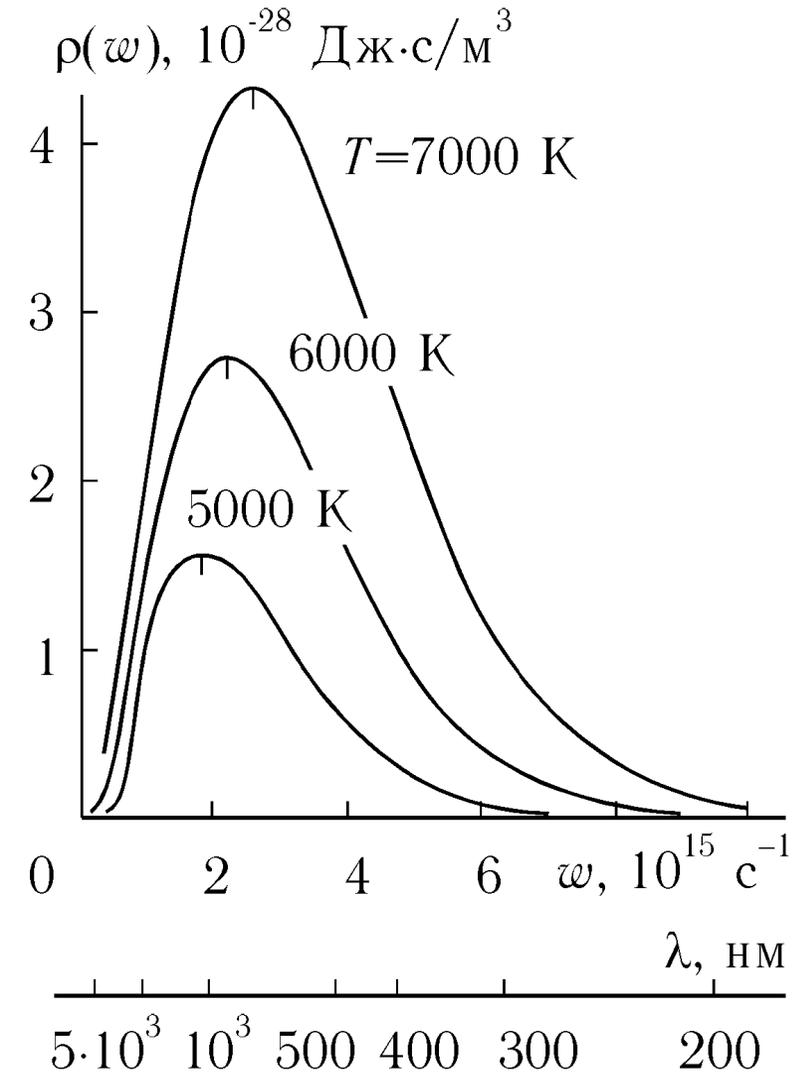
Равновесное тепловое излучение — электромагнитное излучение, испускаемое телом, находящимся в состоянии термодинамического равновесия.

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.



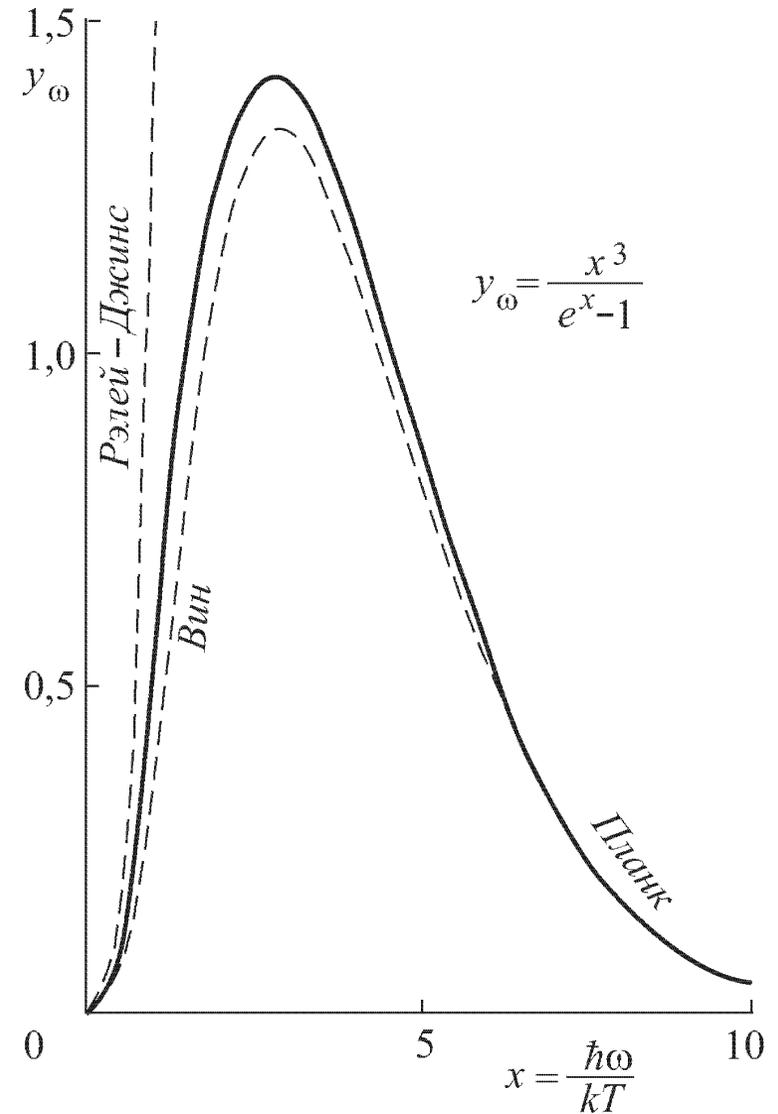
# Тепловое излучение

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

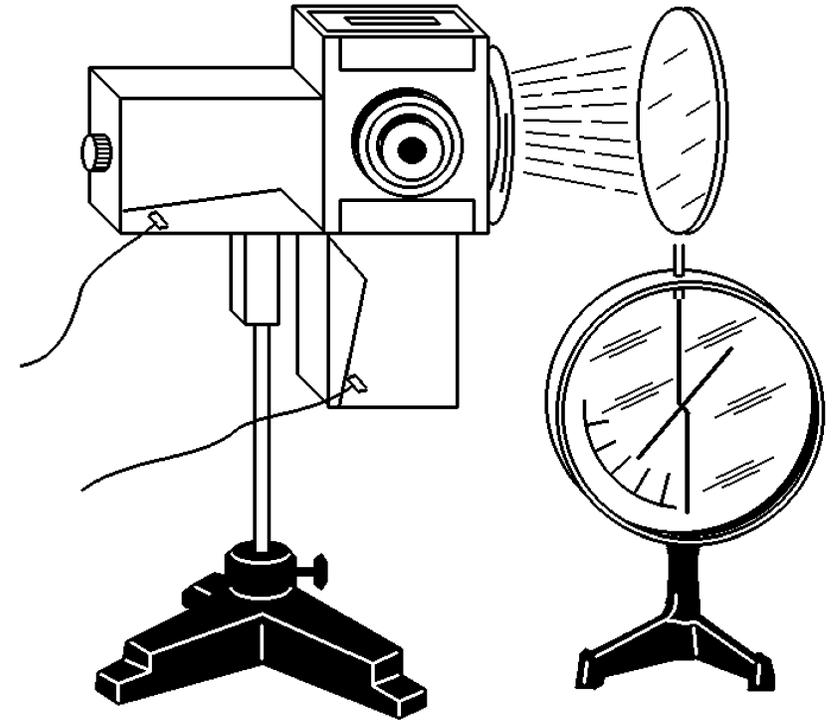
Фотоэффект – испускание веществом электронов под действием падающего на него света.

Эксперименты:

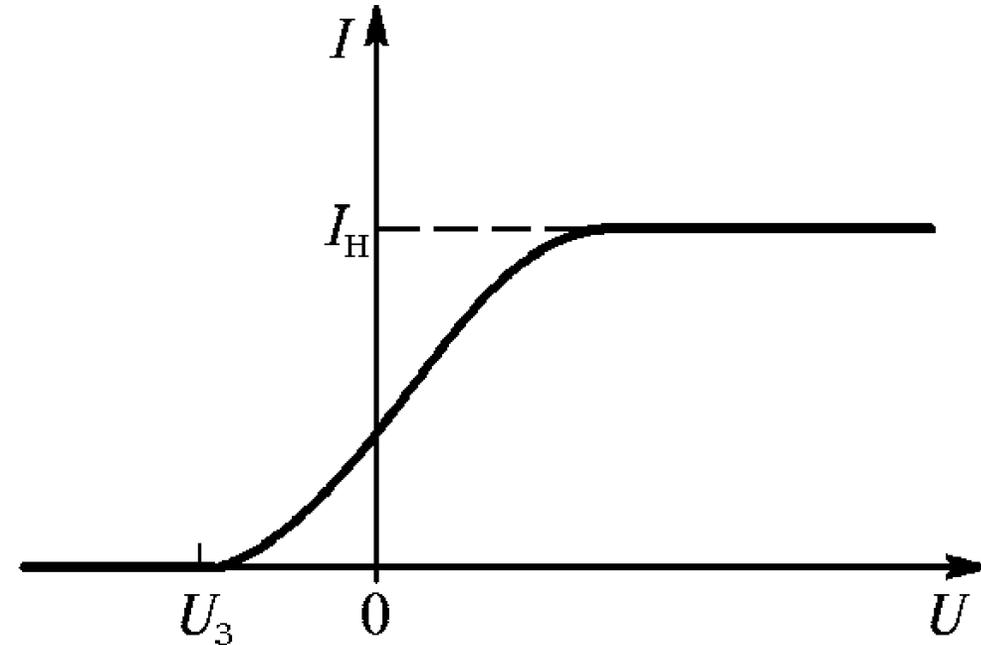
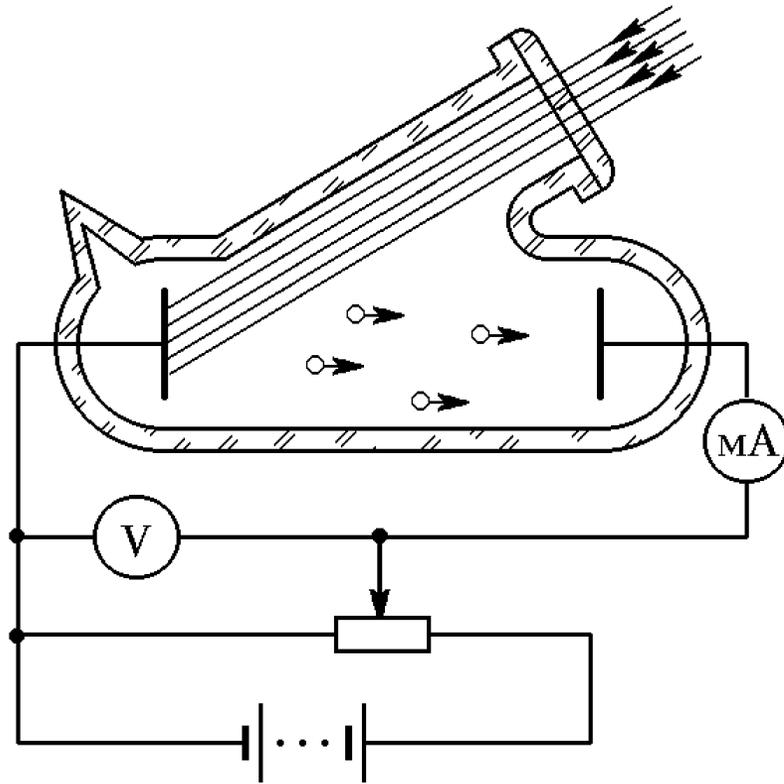
1887 г. – Г. Герц (ускорение разрядки цинковых шариков при облучении ультрафиолетовым светом)

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

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

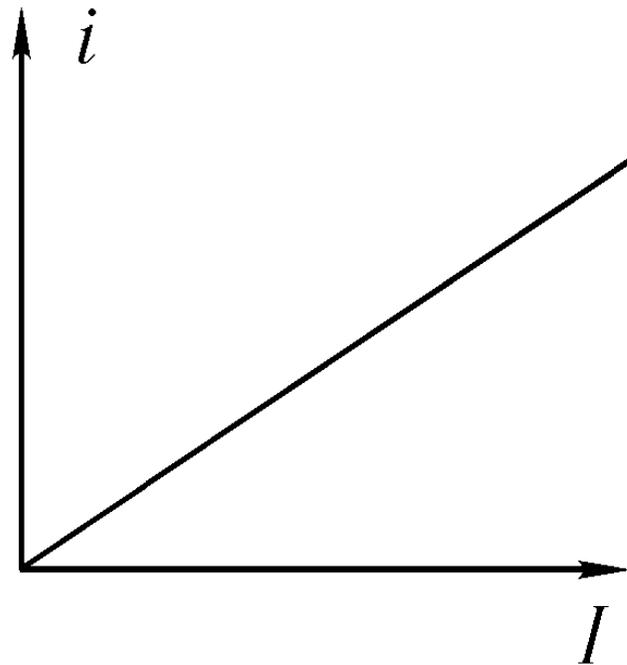
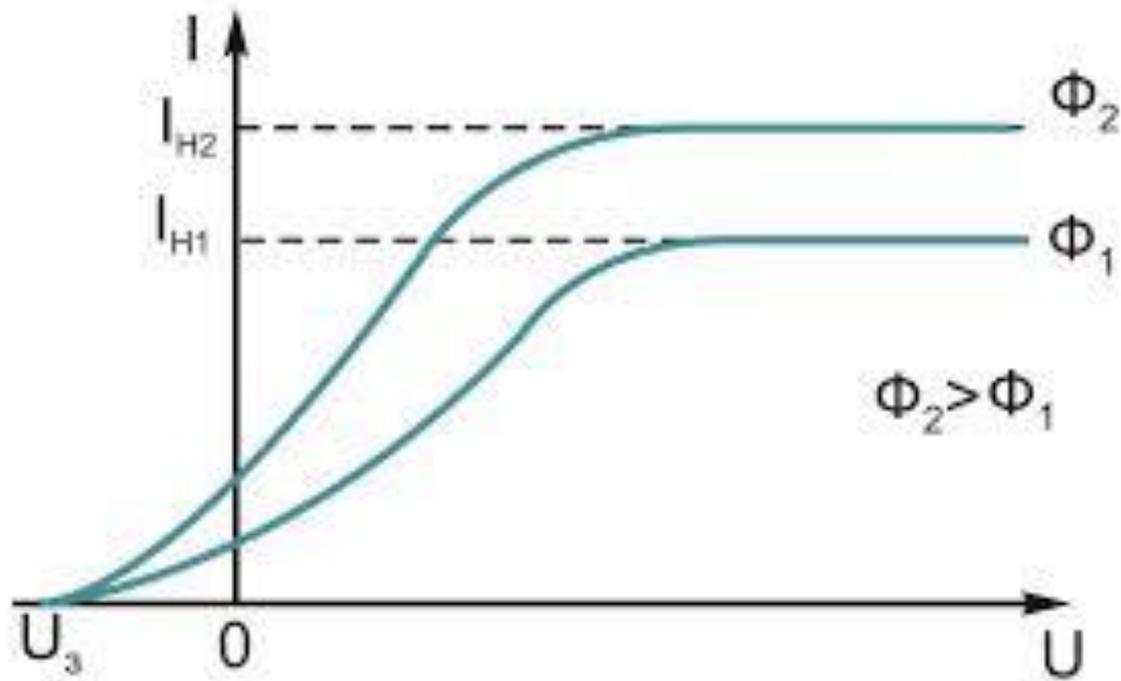


# Схема установки по исследованию фотоэффекта



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

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

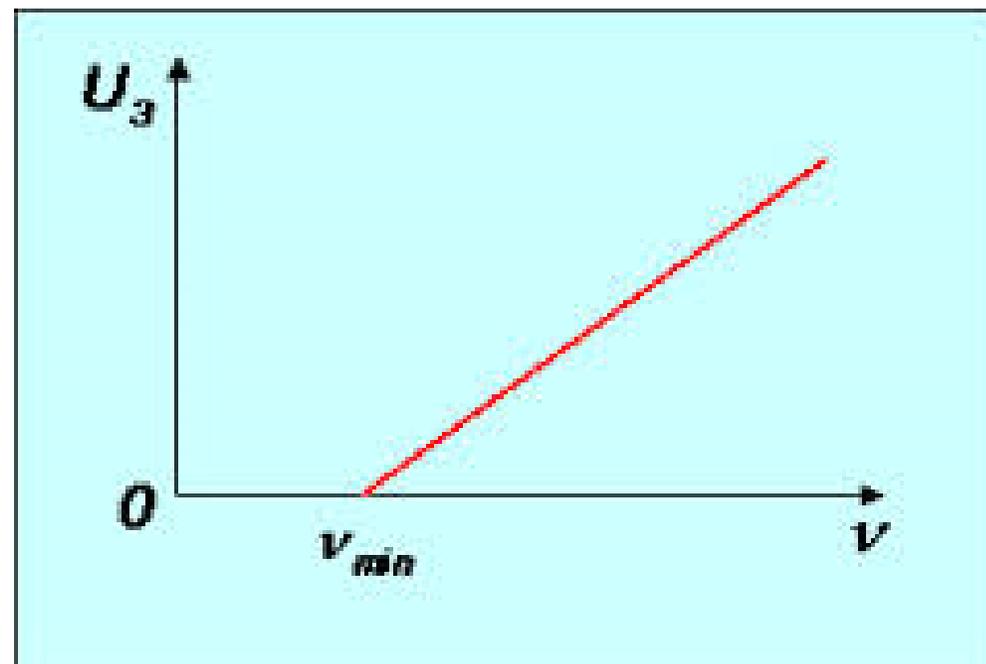
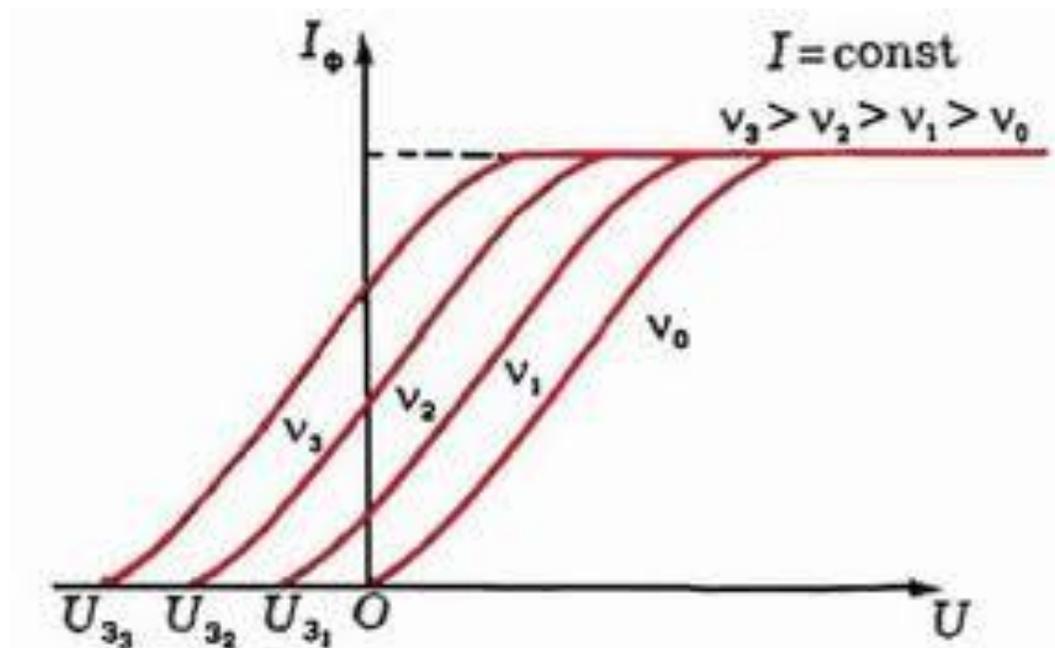
$$W = \frac{1}{2} m v_{\text{макс}}^2 + A_{\text{вых}} = e V_3 + A_{\text{вых}}$$

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  $\nu$  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.

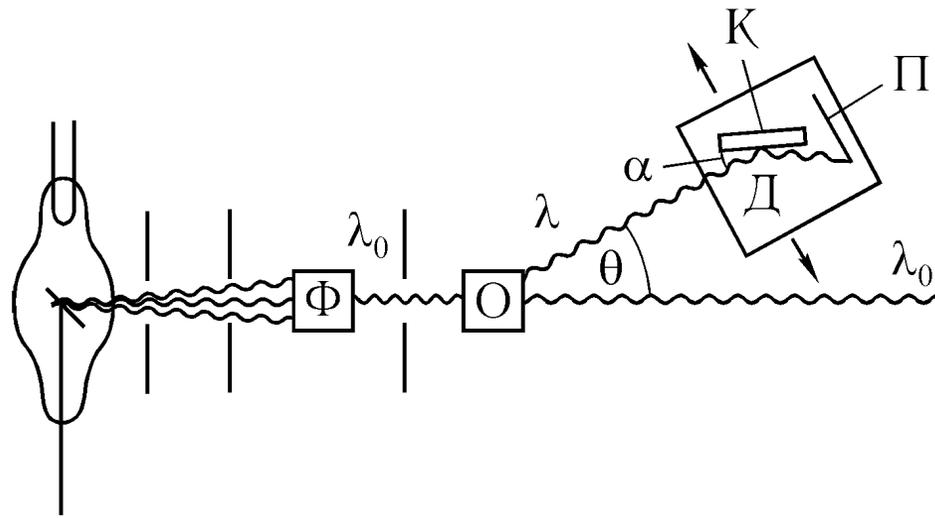
Может ли покоящийся электрон поглотить фотон?

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

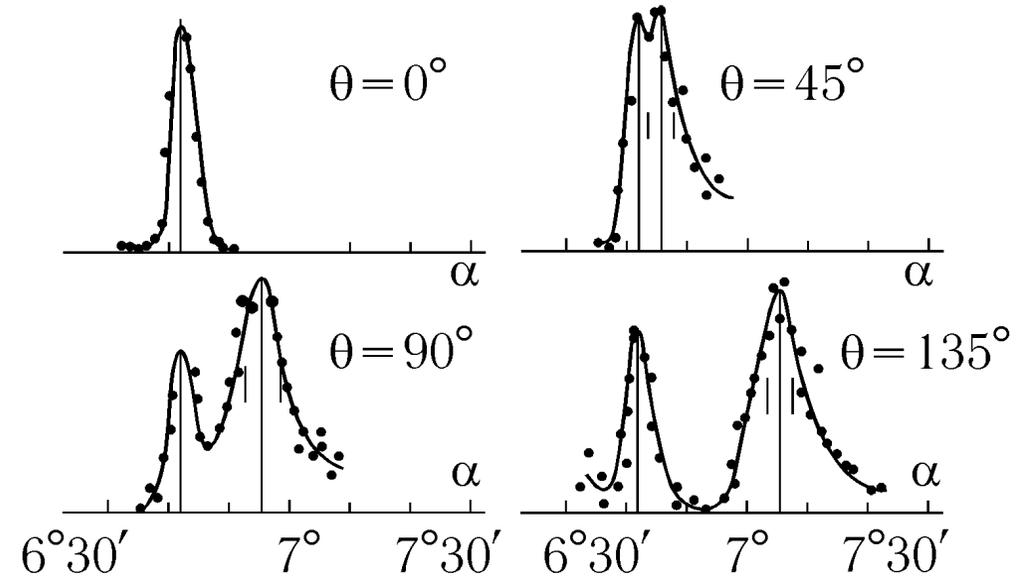
$$(E')^2 - (p'c)^2 = (mc^2)^2$$

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

# Опыты Комптона по изучению рассеяния рентгеновских лучей на веществе



*a*



*б*

В спектре рассеянного излучения кроме излучения с длиной волны равной длине волны  $\lambda_0$  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.**