

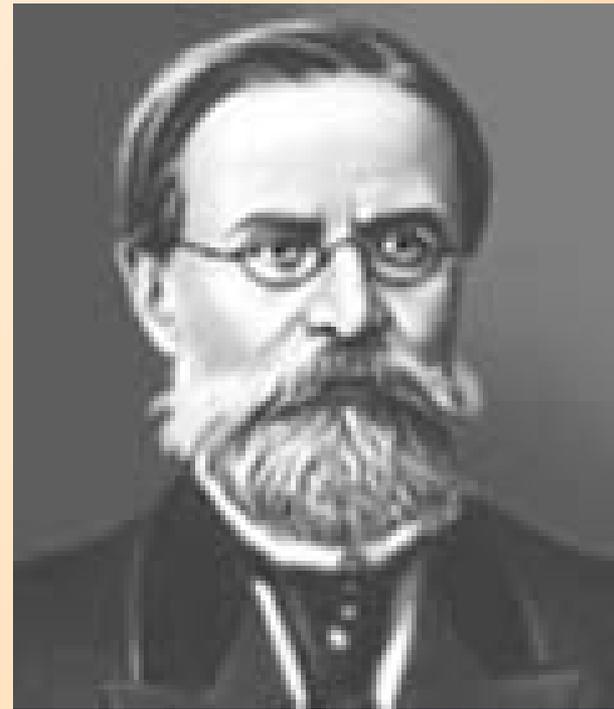
Тема 2. Квантовая природа света

2.1. Внешний фотоэлектрический эффект

Это явление было открыто Г.Герцем в 1887 г. и подробно изучено в работах А.Г.Столетова.



1857—1894



1839—1896

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света

Конденсатор
А.Г. Столетова.

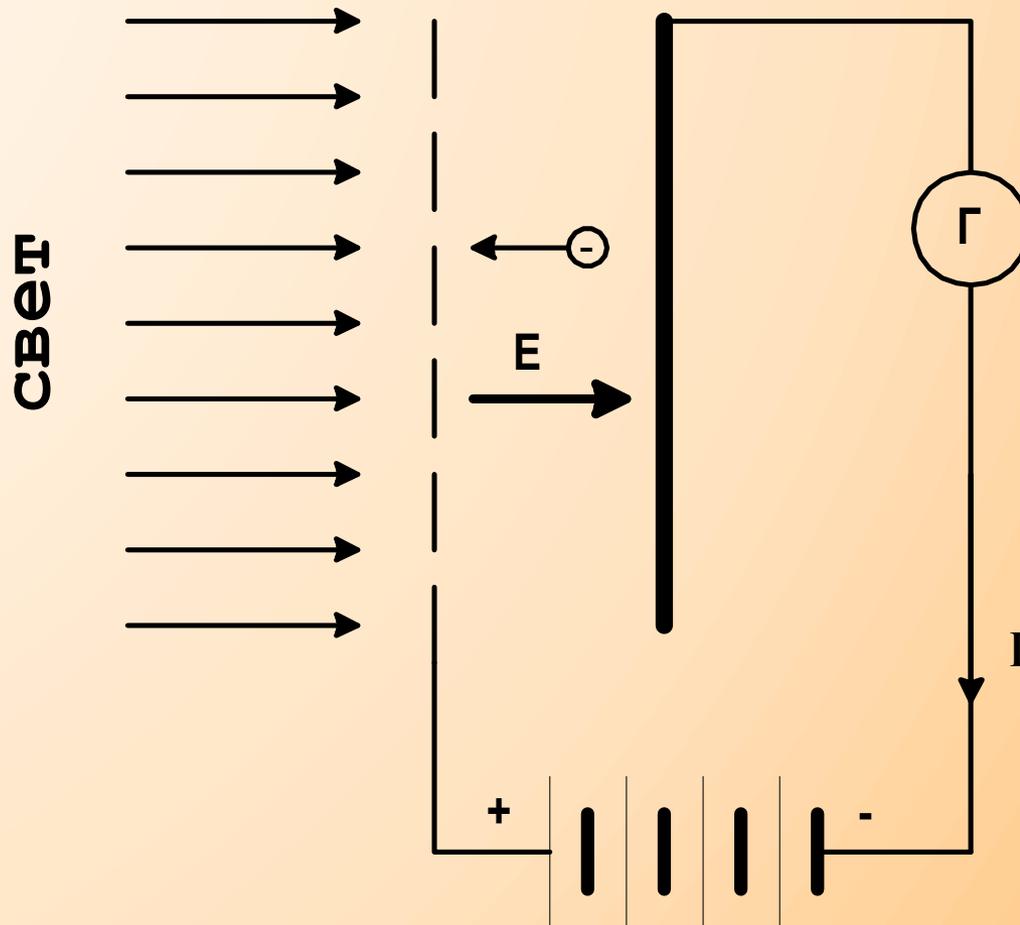
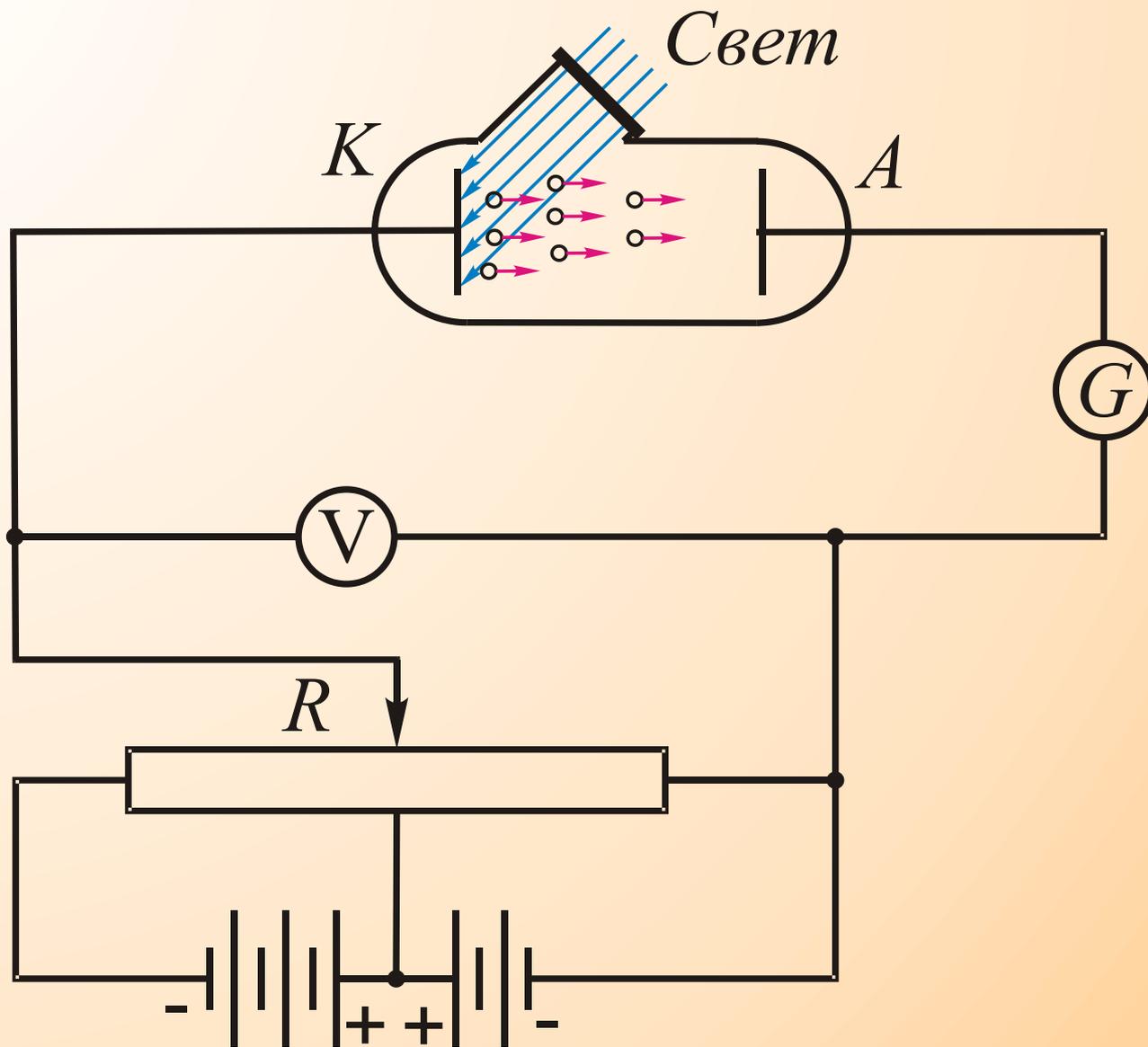
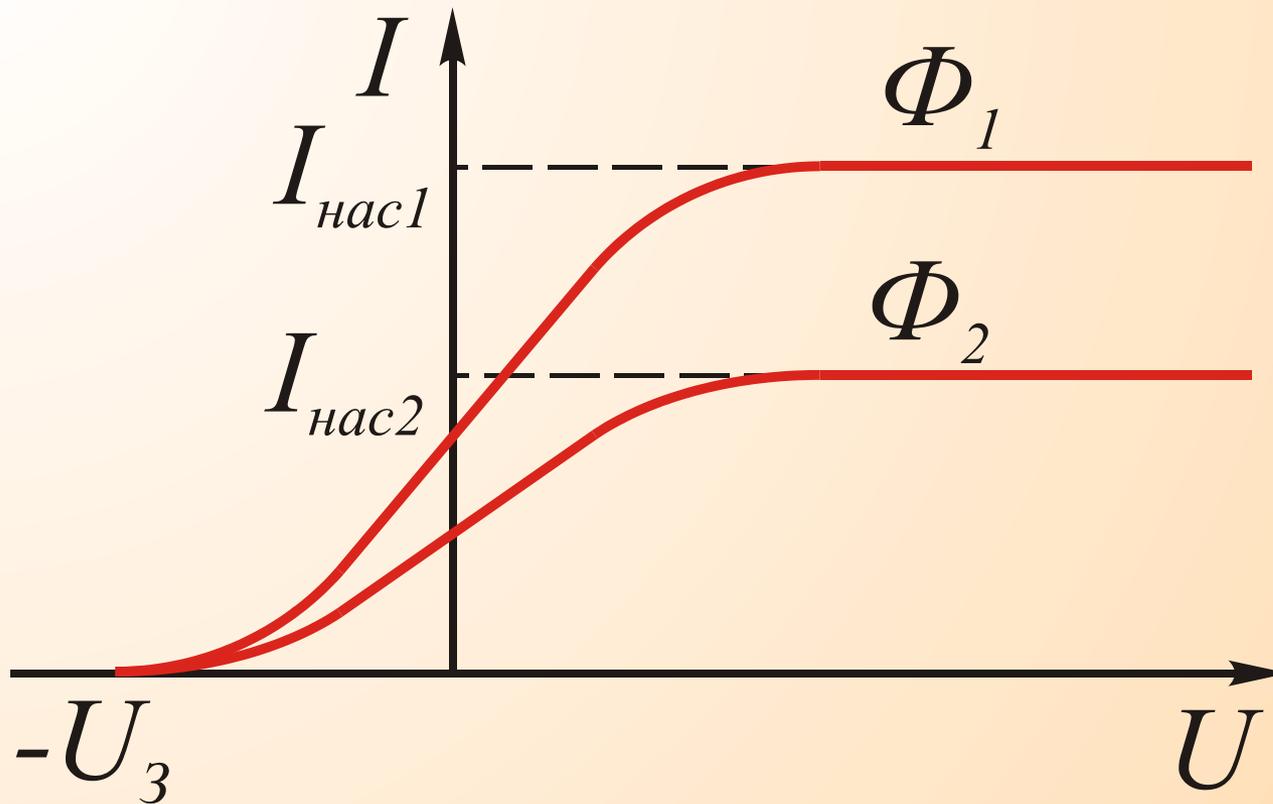


Схема опыта Столетова.



Вольтамперная характеристика



$$\frac{m v_{max}^2}{2} = e U_3$$

- Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, а зависит только от его частоты.
- Ток насыщения прямо пропорционален падающему световому потоку $I_{\text{нас}} \sim \Phi$.
- Фотоэффект начинается только с некоторой частоты ω_0 , при $\omega < \omega_0$ ($\lambda > \lambda_0$) фотоэффект отсутствует.

$$\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega_0} \quad - \quad \underline{\text{Красная граница фотоэффекта}}$$

Предположение Эйнштейна:

Электромагнитные волны поглощаются такими же квантами, как и излучаются.

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$$

Энергия кванта передается электрону, часть ее затрачивается на отрыв электрона с поверхности вещества, а оставшаяся часть — это кинетическая энергия фотоэлектрона.

- **Работой выхода A** называется энергия, которую необходимо затратить, чтобы оторвать электрон с поверхности вещества.

Уравнение фотоэффекта (уравнение Эйнштейна)

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{max}^2}{2} \quad (2.1)$$

Если $h\nu < A$, то фотоэффект отсутствует.

$$\nu_0 = \frac{A}{h} \quad \omega_0 = \frac{A}{\hbar} \quad \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar c}{A} = \frac{hc}{A} \quad (2.2)$$

Задача 2.1

Красная граница фотоэффекта для цинка составляет 310 нм. Определить максимальную кинетическую энергию (в электрон-вольтах) фотоэлектронов и задерживающую разность потенциалов, если на цинк падает ультрафиолетовое излучение с длиной волны 200 нм.

Дано:

$$\lambda_0 = 310 \text{ нм} = 0,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\lambda = 200 \text{ нм} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$W_{K \max} - ? \quad U_3 - ?$$

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A + W_{K \max}$$

$$A = \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$W_{K \max} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0} = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$$

$$W_{K \max} = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} \left(\frac{1}{0,2 \cdot 10^{-6} \text{ М}} - \frac{1}{0,31 \cdot 10^{-6} \text{ М}} \right) =$$

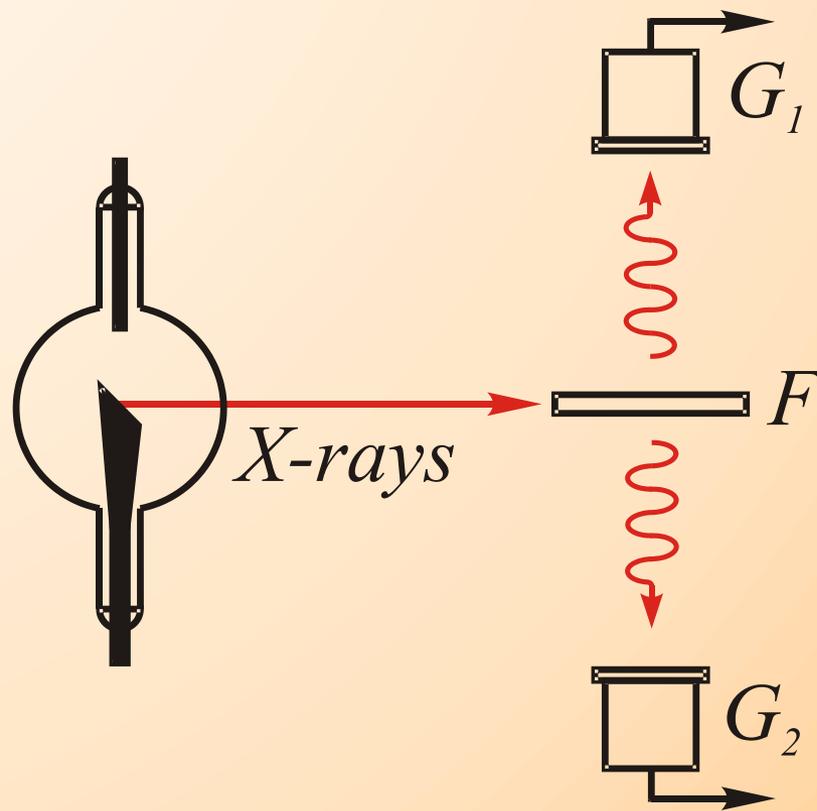
$$= 3,97 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = \frac{3,97 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = \underline{2,63 \text{ эВ}}$$

$$W_{K \max} = eU_3 \Rightarrow U_3 = \underline{2,63 \text{ В}}$$

2.2. ФОТОНЫ

Электромагнитное излучение не только испускается, поглощается, но и распространяется в виде отдельных квантов (*фотонов*).

Опыт Боте:



Энергия фотона определяется его частотой $\nu(\omega)$:

$$\varepsilon_{\phi} = h\nu = \hbar\omega, \quad \text{где} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}, \quad \omega = 2\pi\nu$$

или длиной волны λ :

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{hc}{\lambda}$$

Масса фотона:

$$W = mc^2$$

$$m = \frac{\hbar\omega}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda} \quad (2.3)$$

В вакууме $v = c$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \Rightarrow m_0 = 0$$

В среде $m_0 = 0$, а $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \neq 0 \Rightarrow v = c$

Импульс фотона:

$$W = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$$

$$p_\phi = \frac{\varepsilon_\phi}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (2.4)$$

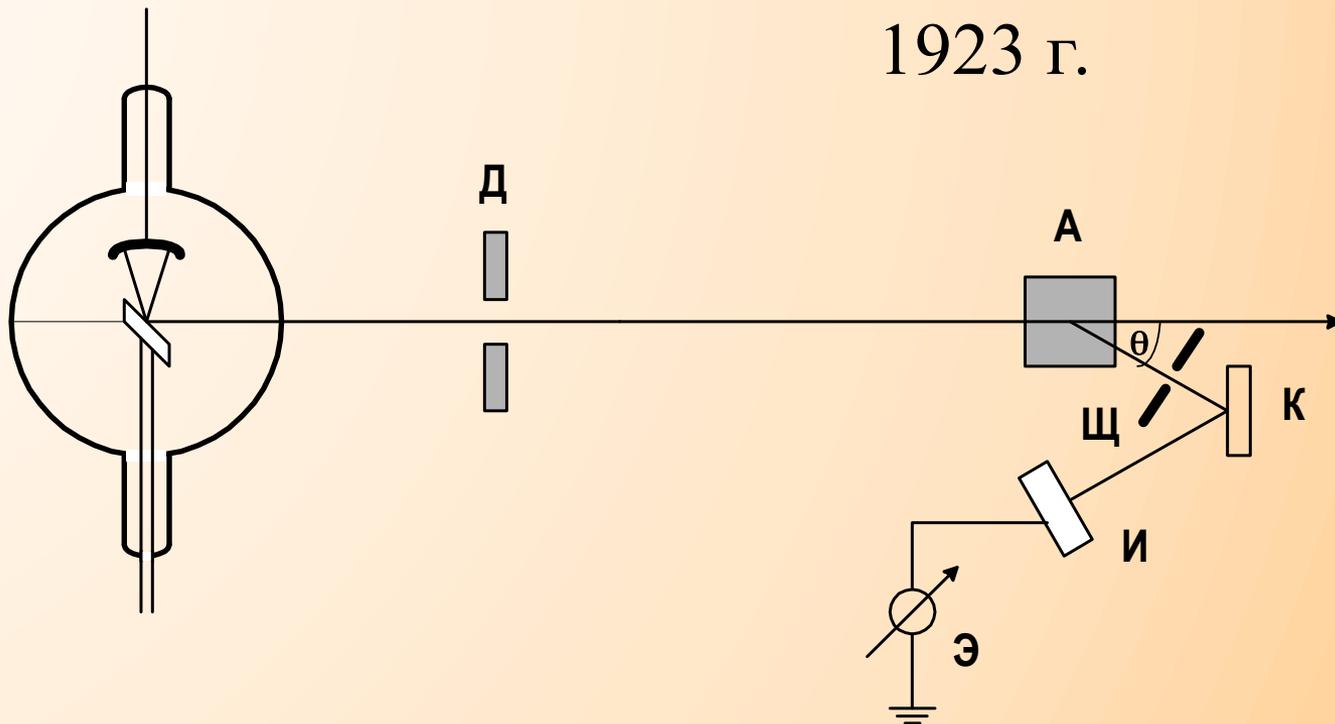
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad p_\phi = \frac{h}{\lambda} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} = \hbar k \quad p_\phi = \hbar k \quad (2.5)$$

Три корпускулярные характеристики фотона (энергия, масса, импульс) связаны с его волновой характеристикой (частотой).

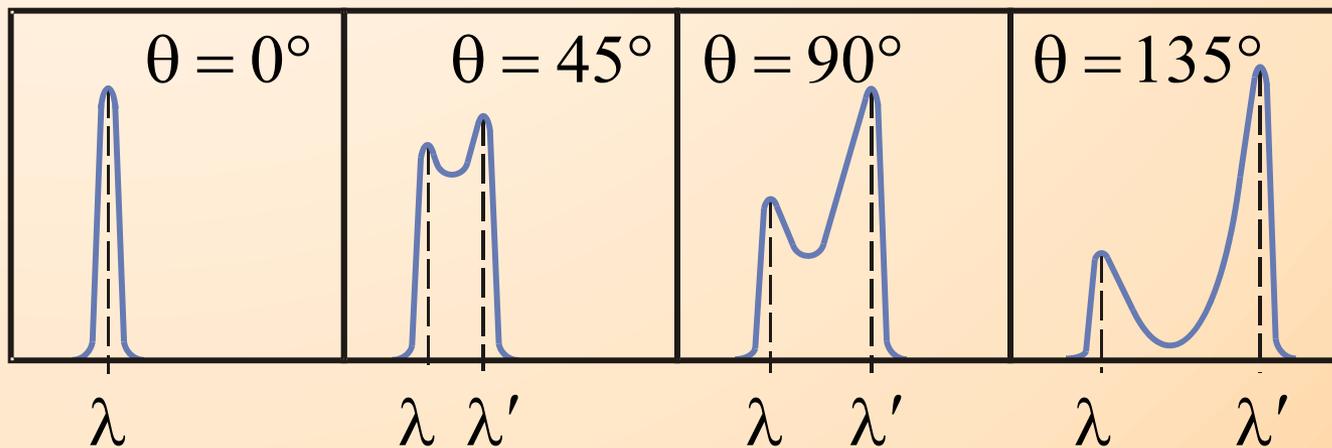
2.3. Эффект Комптона



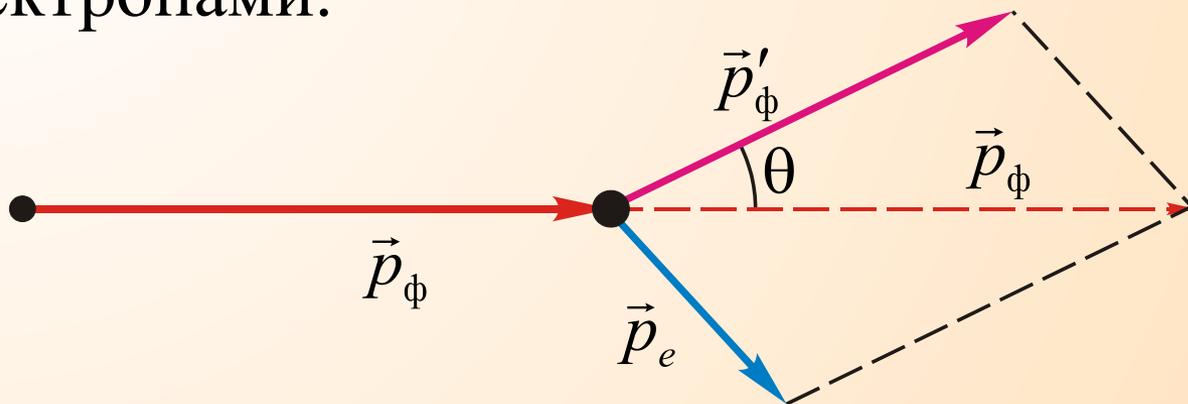
1892 - 1962



1923 г.



Эффект Комптона можно объяснить тем, что процесс рассеяния представляет собой упругое столкновение рентгеновского фотона с почти свободными электронами.



Фотон до столкновения:

$$\varepsilon_{\phi} = \hbar\omega, \quad p_{\phi} = \hbar k$$

Электрон до столкновения:

$$W_e = m_0 c^2, \quad p_e = 0$$

Фотон после столкновения:

$$\varepsilon_{\phi} = \hbar\omega', \quad p_{\phi} = \hbar k'$$

Электрон после столкновения:

$$W_e' = c\sqrt{p_e'^2 + m_0^2 c^2}$$

Из законов сохранения энергии и импульса:

$$\hbar\omega + m_0c^2 = \hbar\omega' + c\sqrt{p_e^2 + m_0^2c^2} \quad (2.6)$$

$$\hbar k = p_e + \hbar k' \quad (2.7)$$

Разделим (2.6) на c ($\omega/c = k$)

$$\sqrt{p_e^2 + m_0^2c^2} = \hbar(k - k') + m_0c \quad (2.8)$$

Возведем (2.8) в квадрат

$$p_e^2 = \hbar(k^2 + k'^2 - 2kk') + 2\hbar m_0c(k - k') \quad (2.9)$$

Возведем (2.7) в квадрат

$$p_e^2 = \hbar^2 (k - k')^2 = \hbar^2 (k^2 - k'^2 - 2kk' \cdot \cos \theta) \quad (2.10)$$

Сравним (2.9) и (2.10)

$$m_0 c (k - k') = \hbar k k' (1 - \cos \theta) \quad (2.11)$$

Умножим (2.11) на $\frac{2\pi}{m_0 c k k'}$

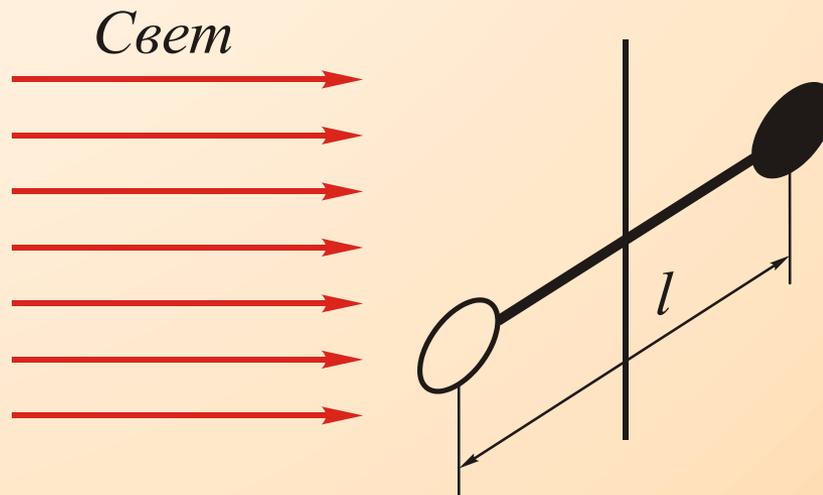
$$\frac{2\pi}{k'} - \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi \hbar}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (2.12)$$

$$\frac{2\pi}{k} = \lambda \quad \boxed{\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta)} \quad (2.13)$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi\hbar}{m_0c} = 0,0243 \text{ \AA} \quad - \text{ КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ}$$

2.4. Давление света.

Опыт П. Лебедева (1900 г.)



Зеркальный лепесток:

$$\Delta p_{\phi} = p_{\phi} - (-p_{\phi}) = 2p_{\phi}$$

Зачерненный лепесток:

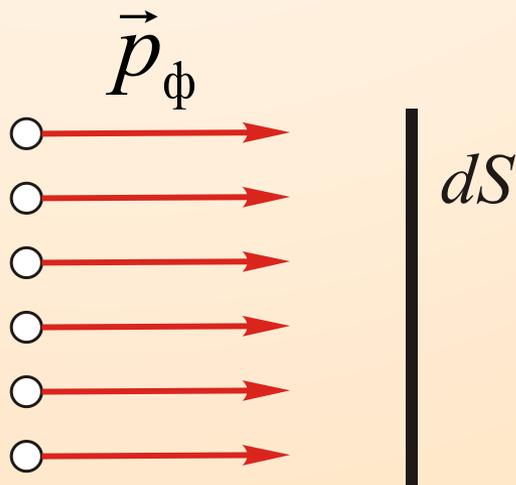
$$\Delta p_{\phi} = p_{\phi} - 0 = p_{\phi}$$

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$F_1 = \frac{2p_{\phi}}{\Delta t}$$

$$F_2 = \frac{p_{\phi}}{\Delta t}$$

$$M = (F_1 - F_2) \frac{l}{2}$$



$$N = \frac{I \cdot dS \cdot dt}{\epsilon_{\phi}} \quad (2.14)$$

Коэффициент отражения ρ – часть фотонов, отразившихся от площадки.

До соударения: $p = N \cdot p_{\phi}$

После соударения: $p = N \cdot \rho \cdot p_{\phi}$

$$\Delta p = N \cdot p_{\phi} - (- N \cdot \rho \cdot p_{\phi}) = (1 + \rho)p_{\phi}N$$

$$F \cdot dt = (1 + \rho)p_{\phi}N$$

$$p_{\phi} = \frac{\varepsilon_{\phi}}{c}$$

$$F \cdot dt = (1 + \rho) \frac{\varepsilon_{\phi}}{c} \cdot \frac{I \cdot dS \cdot dt}{\varepsilon_{\phi}} = \frac{I}{c} (1 + \rho) dS \cdot dt$$

$$P = \frac{dF}{dS} = \frac{I}{c} (1 + \rho) \quad (2.15)$$

2.5. Корпускулярно-волновой дуализм.

Волновые свойства

- интерференция
- дифракция
- поляризация

Корпускулярные свойства

- излучение ЭМ волн
- фотоэффект
- эффект Комптона

Чем меньше длина волны, тем сильнее проявляются корпускулярные свойства и тем слабее – волновые.