

Корпускулярные свойства света



Храмко Александр

План:

1. Корпускулы и волны.
2. Фотоны. Энергия и импульс светового кванта.
3. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна.
4. Эффект Комптона.
5. Корпускулярно-волновой дуализм.

демонстрации

фотоэффект (опыт Герца)

постоянная Планка – $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-27}$ эрг с
фундаментальная константа

$$\hbar = 1,055 \cdot 10^{-27} \text{ эрг с} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$$

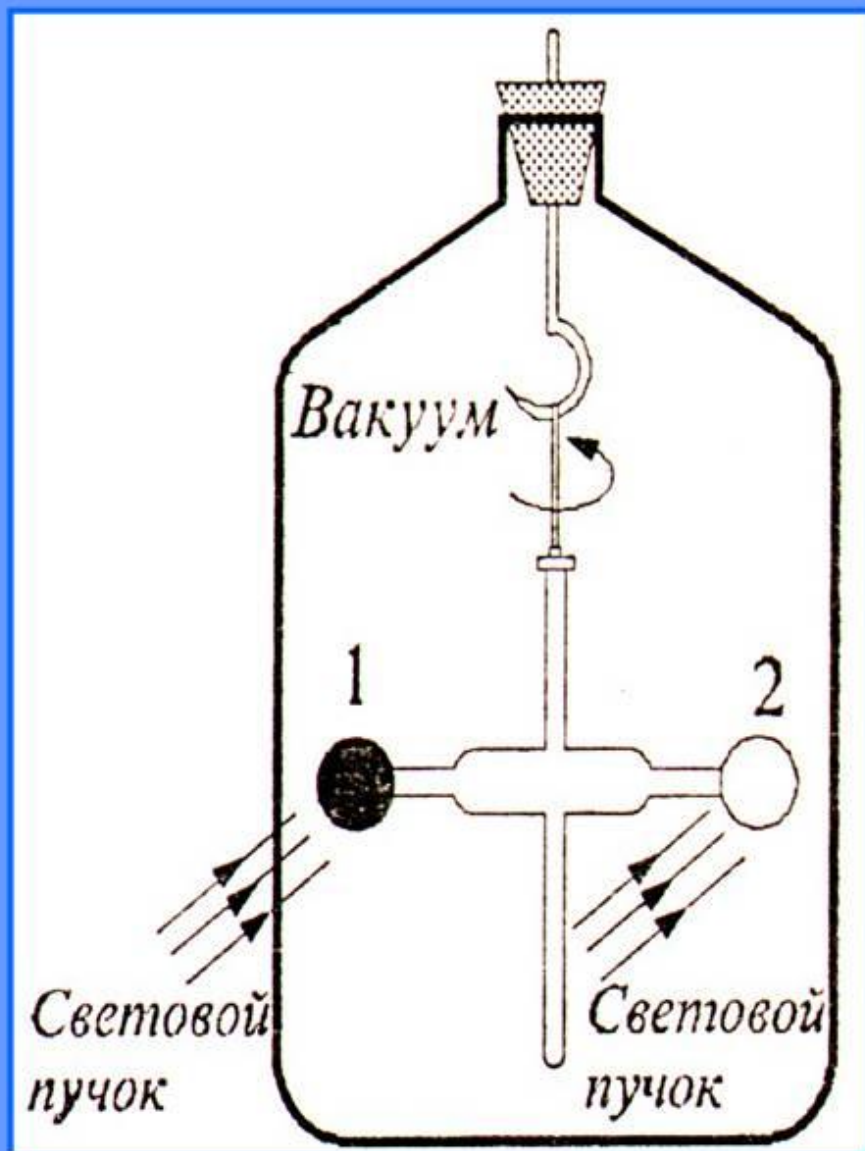
$$h = 2\pi\hbar = 6,626 \cdot 10^{-27} \text{ эрг с} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$$

$$h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ эВ с}$$

Импульс фотона и давление света

- Интенсивность светового потока
 $I = N \hbar \omega$
- При зеркальном отражении света импульс фотона изменяется на:
 $\Delta p = \hbar \omega / c - (- \hbar \omega / c) = 2 \hbar \omega / c$
- Давление света
 $P = N \Delta p = 2I / c$

Схема опыта П.Н. Лебедева



В 1900 году русский физик П.Н.Лебедев поставил опыт по измерению давления света. Давление света зависит от коэффициента отражения поверхности: при отражении от зеркальной поверхности крылышко (2) получает импульс $P_2 \approx 2P$. Поверхность чёрного крылышка (1) поглощает свет и $P_1 \approx P$. Для устранения тепловых потоков, связанных с движением молекул, в сосуде с прибором создавался вакуум. Экспериментальное измерение давления света ($\approx 10^{-6} \text{ Н/м}^2$) с точностью до 2% совпало с теоретическими расчётами Максвелла.

Фотоэлектрический эффект.

- Внешний фотоэффект – испускание электронов веществом под действием под действием падающего на него света.
(Герц, 1887 г., А. Г. Столетов, 1888-1890 г.г., Ф. Ленард, 1900 г.)
- Как изучают фотоэффект:
снимают вольт-амперную характеристику вакуумной лампы при облучении холодного катода светом фиксированной частоты.

Фотоэффект, опыт Герца

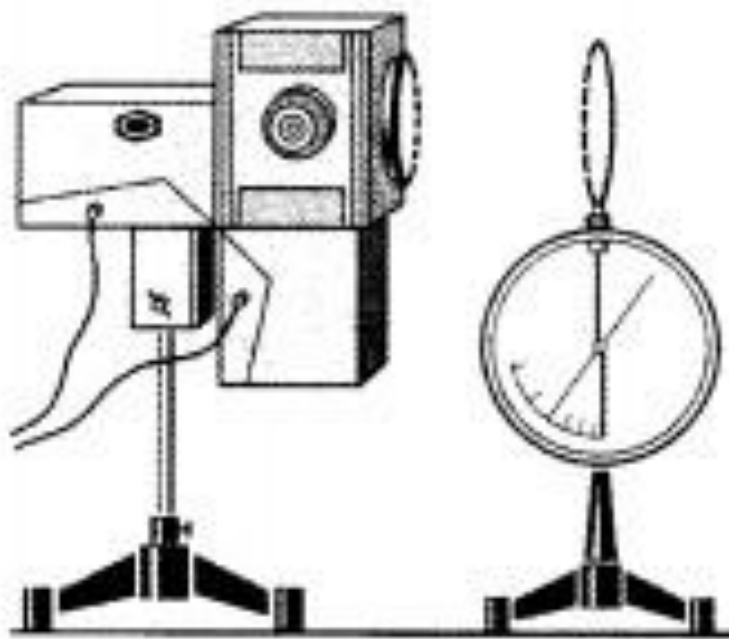
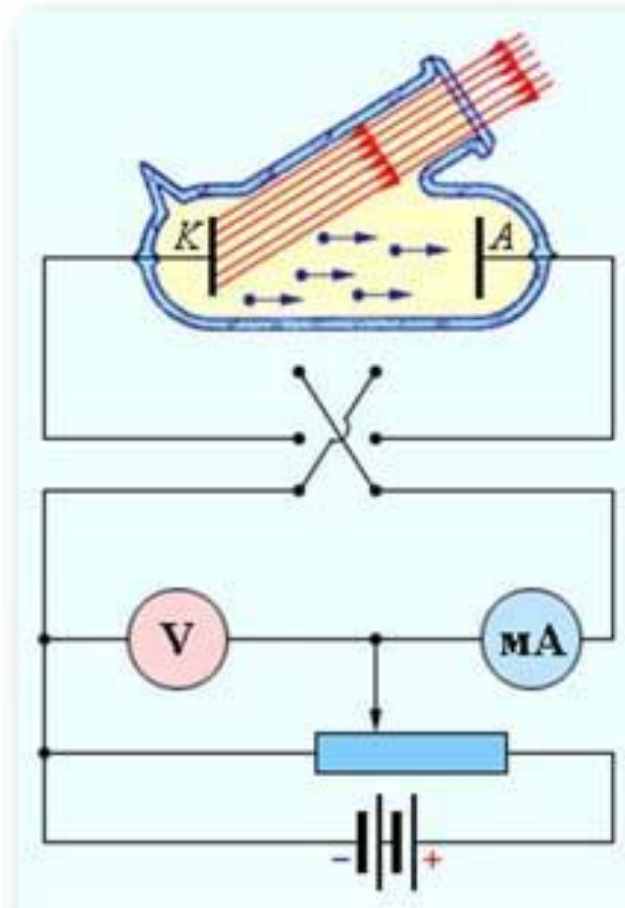
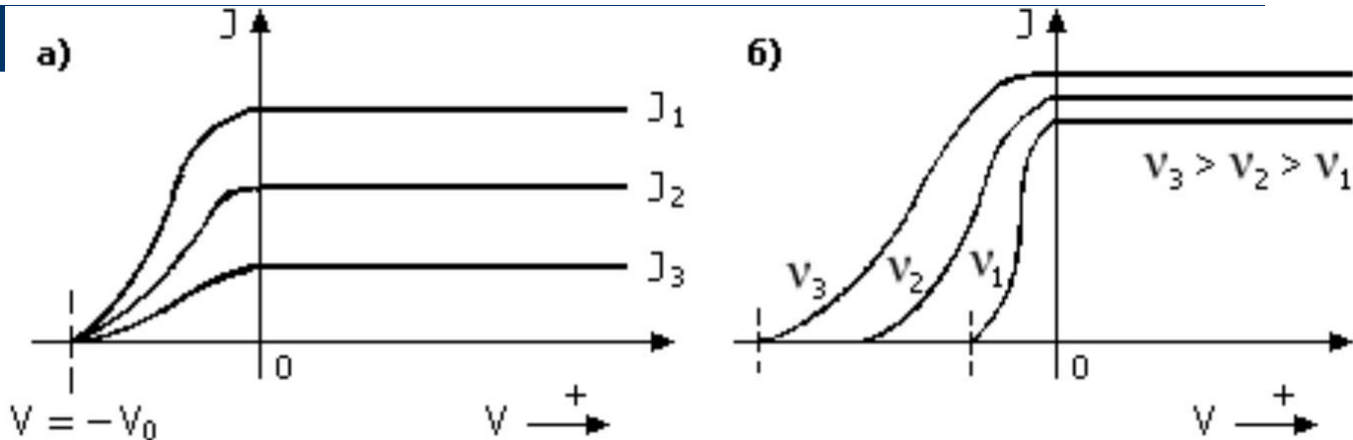


Рис. 11.1

Экспериментальная установка для изучения фотоэффекта



Вольт-амперная характеристика вакуумной лампы

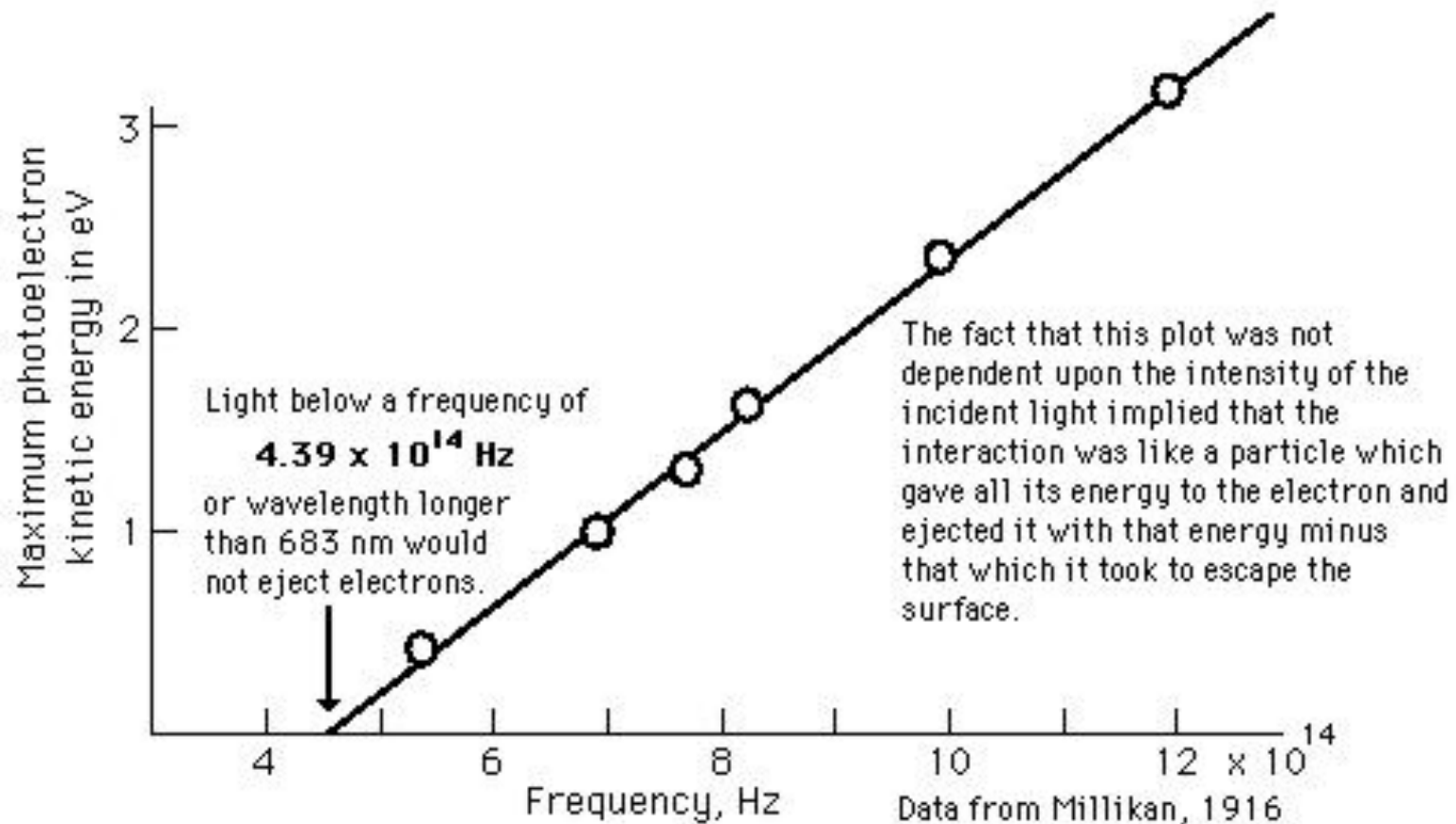


- По вольт-амперной характеристике узнают:
 - число электронов, вырывающихся из катода в единицу времени ($N = I_{\text{нас}}/e$)
 - Максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:
$$\frac{1}{2} m v^2 = e U_{\text{зад}}$$

Законы фотоэффекта

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 $\lambda > \lambda_{\text{max}}$ ни при каких интенсивностях света.
3. Количество электронов, вырываемых светом из металла в единицу времени, прямо пропорционально интенсивности световой волны.
4. Фотоэффект практически безинерционен: фототок возникает практически мгновенно после облучения катода (при условии, что $\lambda < \lambda_{\text{max}}$)

Зависимость кинетической энергии фотоэлектронов от частоты $K = f(\omega)$ (Милликен, 1916 г.)



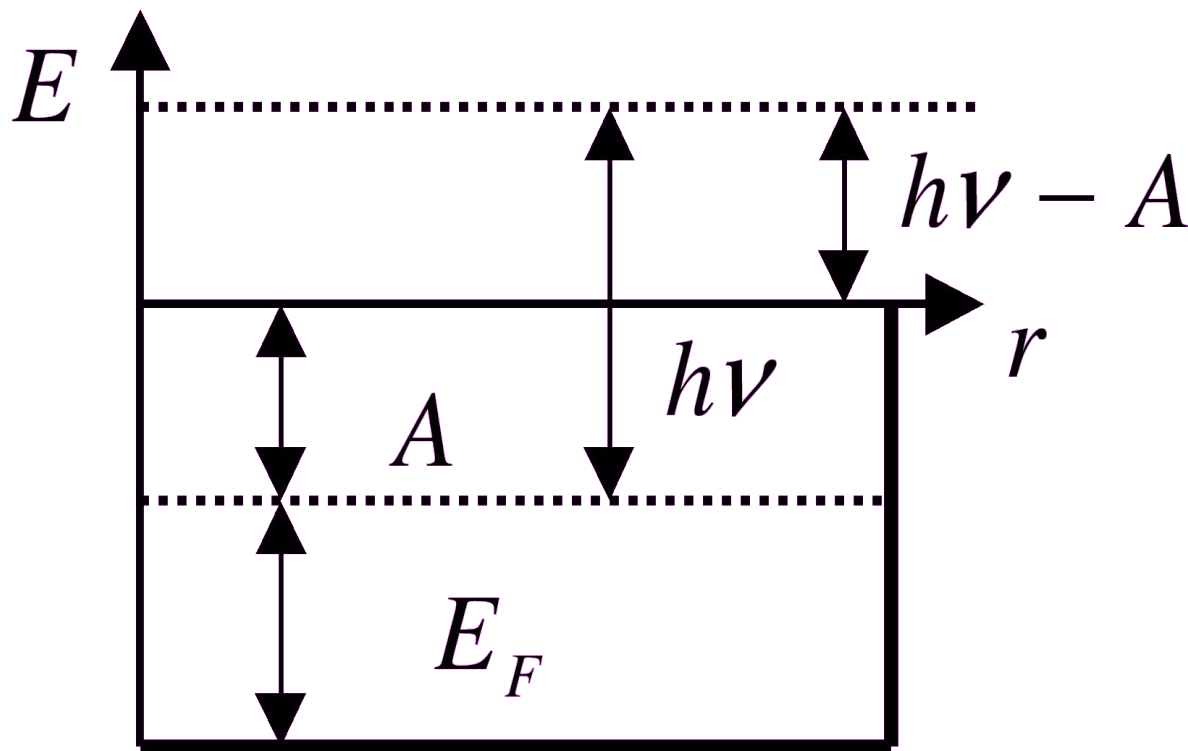
фотоэффект нельзя объяснить классической физикой

- По классике – электрон постепенно накапливает энергию, необходимую для вылета из катода.
- Сколько потребуется для этого времени?
Оценка:
- Лампа: мощность $P = 100$ Вт, $r = 1$ м;
катод: $A_{\text{вых}} = 3,74$ эВ (цинк $\mu = 65$ г/моль, $\rho = 7$ г),
межмолекулярное расстояние
 $d = (\mu/N_A \rho)^{1/3} \approx 2,5 \text{ \AA}$; $\sigma \sim d^2 \approx 6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$
За время t атом должен накопить $E = (P/4\pi r^2)\sigma t$
 $> A_{\text{вых}} \rightarrow t > 1,25 \text{ с}$

Эйнштейновская теория фотоэффекта (А. Эйнштейн, 1905 г.)

- Электромагнитное поле имеет дискретную структуру.
- Элементарная частица (квант) электромагнитного поля – *фотон*.
- Фотоны могут поглощаться и излучаться веществом.
- Энергия фотона $\varepsilon = \hbar\omega$
- Фотоэффект – результат неупругого столкновения фотона с электроном

Энергетическая схема фотоэффекта



Характерные величины

- Работа выхода $A_{\text{вых}} \sim 2 - 5 \text{ эВ}$
- Полезная формула для расчёта энергии фотона:
 $\varepsilon(\text{эВ}) = 1.24/\lambda(\text{мкм})$
- $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$
 $\varepsilon(\text{эВ}) \approx 2.5 \text{ эВ}$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта – закон сохранения энергии для системы фотон-электрон

$$(m_e v^2/2)_{\max} = \hbar\omega - A_{\text{вых}}$$

1. Максимальная кинетическая энергия линейно зависит от частоты и не зависит от интенсивности. Интенсивность влияет только на количество вырванных электронов.
2. Низкочастотная граница фотоэффекта ω_0 определяется работой выхода

$$\hbar\omega_0 = A_{\text{вых}}$$

Инерционность фотоэффекта

$\Delta t \sim 10^{-12} \text{ с}$

- Ультрафиолет $\lambda \approx 0,1 \text{ мкм}$; $\varepsilon \sim 10 \text{ эВ} \rightarrow$ энергия фотоэлектронов $\ll m_e c^2 = 511 \text{ кэВ}$
- $m_e v^2/2 \sim \varepsilon \rightarrow v \sim 10^8 \text{ см}$
- Ультрафиолет проникает в металл не глубже $\delta \sim 1 \text{ мкм} \rightarrow$ время вылета электронов $\Delta t \sim 10^{-12} \text{ с}$ – т.е. фотоэффект практически мгновенный, безинерционный процесс.

постоянная Планка – $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-27}$ эрг с фундаментальная константа

Угол наклона в зависимости $V_{\text{зад}} = V(\omega)$ $\text{tg} \alpha = \hbar/e$:

$$(m_e v^2/2)_{\text{max}} = eV_{\text{зад}} = \hbar\omega - A_{\text{вых}} \rightarrow$$
$$V_{\text{зад}} = (\hbar/e)\omega - (A_{\text{вых}}/e)$$

$$\hbar = 1,055 \cdot 10^{-27} \text{ эрг с} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$$

$$h = 2\pi\hbar = 6,626 \cdot 10^{-27} \text{ эрг с} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$$

$$h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ эВ с}$$

ФОТОН

- Энергия фотона $\varepsilon = \hbar\omega$
- Для любой частицы $\varepsilon^2 - p^2c^2 = (mc^2)^2$
- Масса (покоя) фотона $m = 0$
(по современным данным $m < 10^{-27}$ эВ)
- Скорость движения $v = pc^2/\varepsilon = c \rightarrow$
- Импульс фотона $p = \varepsilon/c = \hbar\omega/c = \hbar k$
- Чем фотон отличается от «настоящих» частиц? — фотоны могут исчезать и появляться $\rightarrow$ число частиц в замкнутой системе не сохраняется!

Масса фотона

- Радиолакационные методы измерения скорости дают $m_{\phi} < 4 \cdot 10^{-21} m_e$:

$$\beta = pc/(\epsilon_0^2 + p^2c^2)^{1/2} \approx$$
$$1 - \frac{1}{2} (\epsilon_0/\hbar\omega)^2 = 1 - \frac{1}{2} (c\lambda m_{\phi}/h)^2$$

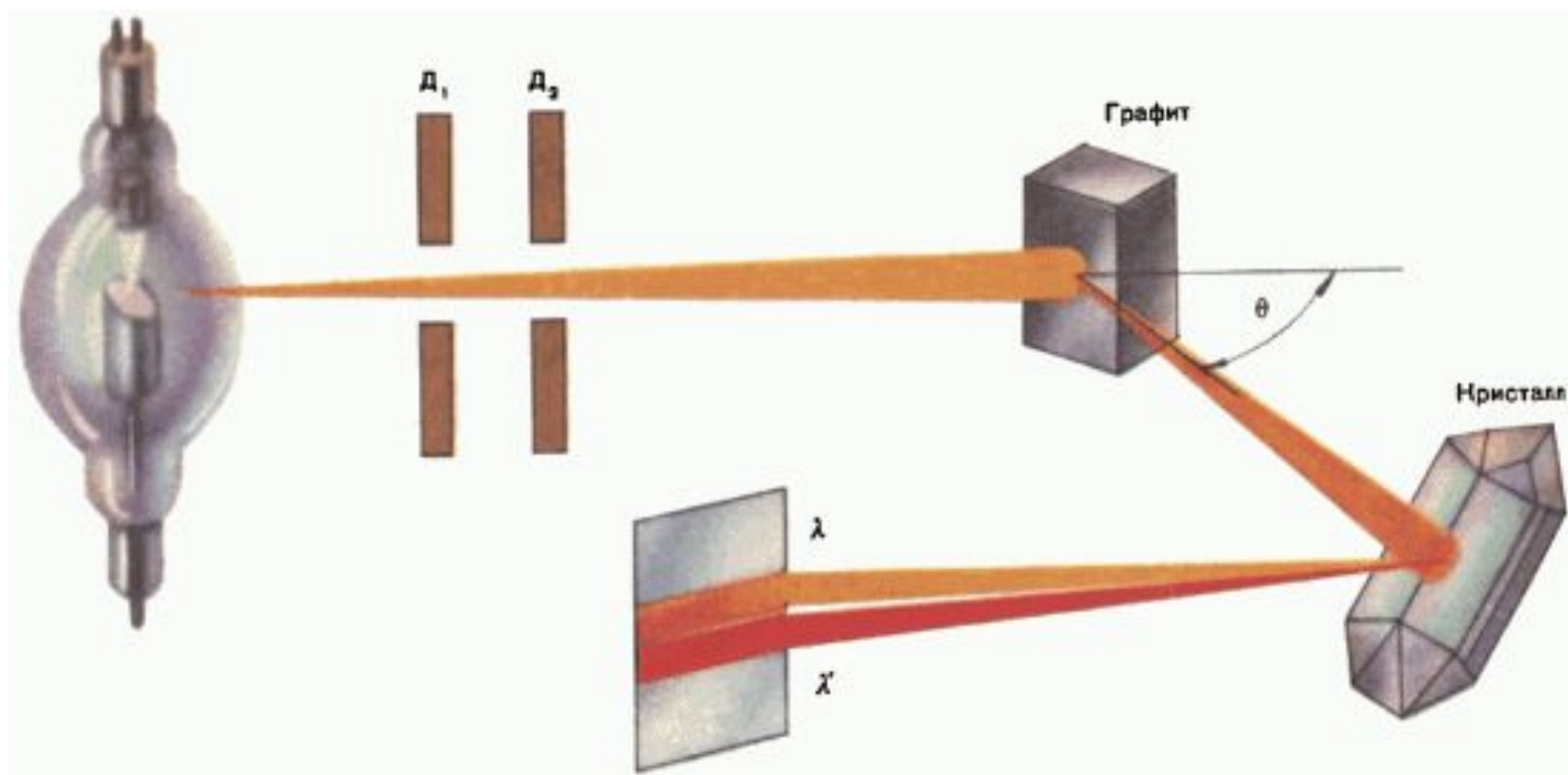
Фотон – корпускула (частица) или волна?

- Интерференция, дифракция, поляризация – проявление волновых свойств света
- Взаимодействие с веществом (фотоэффект, эффект Комптона) – свойства частиц
- Двойственная природа света: фотон обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами - **корпускулярно-волновой дуализм**
- **корпускулярно-волновой дуализм – характерное свойство характерно для всех микрообъектов**

Невозможность фотоэффекта на свободном электро́не

- Свободный электрон не может поглотить (или излучить) фотон! – не позволяют законы сохранения энергии и импульса

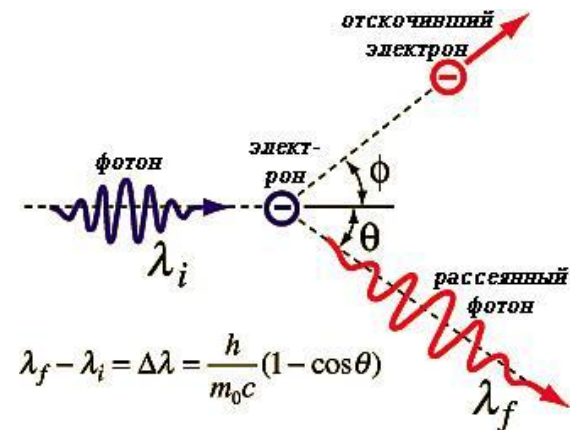
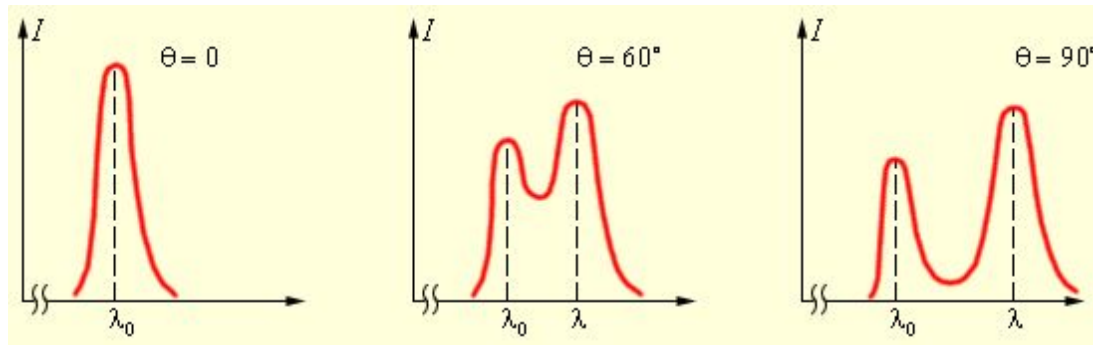
Эффект Комптона (1922 г) – упругое рассеяние фотонов на свободных электронах



Опыт Комптона (1922 г)

- Рассеяние рентгеновских лучей на веществе.
- Измерялась энергия (длины волн) фотонов, рассеянных под разными углами. (В качестве дифракционной решётки использовался кристалл).
- Что получилось: в рассеянном свете кроме несмещённой линии λ_0 наблюдалась линия λ с большей длиной волны:
$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \Lambda_c (1 - \cos\theta) = 2\Lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$
$$\Lambda_c = \frac{2\pi\hbar}{m_e c} = 2,43 \cdot 10^{-10} \text{ см} - \text{комптоновская длина волны.}$$

Результаты эксперимента



Эффект Комптона

Закон сохранения энергии:

$$\varepsilon_{ph} + \varepsilon_0 = \varepsilon_{ph}' + \varepsilon_e$$

$$\mathbf{p}_{ph} = \mathbf{p}_{ph}' + \mathbf{p}_e$$

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_{ph}^2 + \varepsilon_0^2 + \varepsilon_{ph}'^2 + 2\varepsilon_{ph}\varepsilon_0 - 2\varepsilon_{ph}\varepsilon_{ph}' - 2\varepsilon_0\varepsilon_{ph}'$$
$$c^2 p_e^2 = c^2 p_{ph}'^2 + c^2 p_{ph}^2 - 2p_{ph}' p_{ph} c^2 \cos\theta \rightarrow$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \Lambda_c(1 - \cos\theta)$$

$$\Lambda_c = 2\pi\hbar/m_e c = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ см}$$

Численные значения в опыте Комптона

- Рентгеновская трубка излучала жёсткий рентген с $\lambda_0 = 0.71 \text{ \AA} = 0,71 \cdot 10^{-4} \text{ мкм} \rightarrow \varepsilon_{\text{ph}} = 1,24/\lambda_0 = 17.5 \text{ кэВ} \gg \text{энергии связи электронов в лёгких атомах} \rightarrow \text{электроны свободные!}$
- Условие Вульфа-Брэга для рассеяния рентгеновских лучей на кристалле (φ – угол скольжения; d – межплоскостное расстояние)
:
$$2d\sin\varphi = n\lambda$$