

# Лекция № 7

## Корпускулярные свойства света

**Алексей Викторович  
Гуденко**

31/03/2017

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

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

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

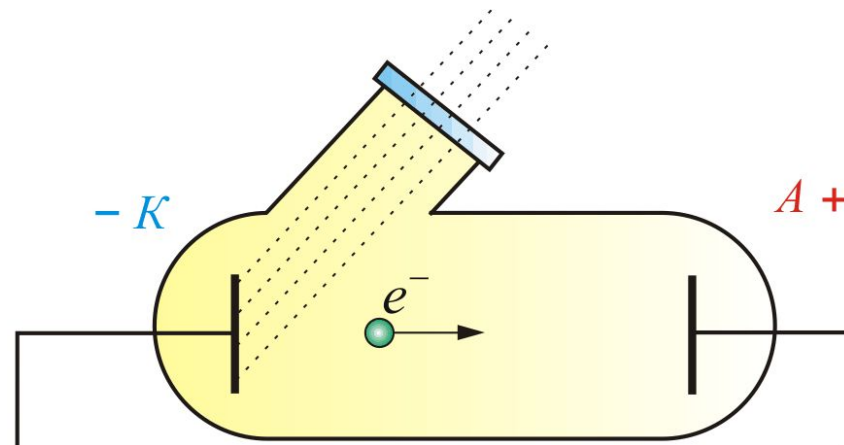
$$h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ эВ с}$$

# Фотоэлектрический эффект

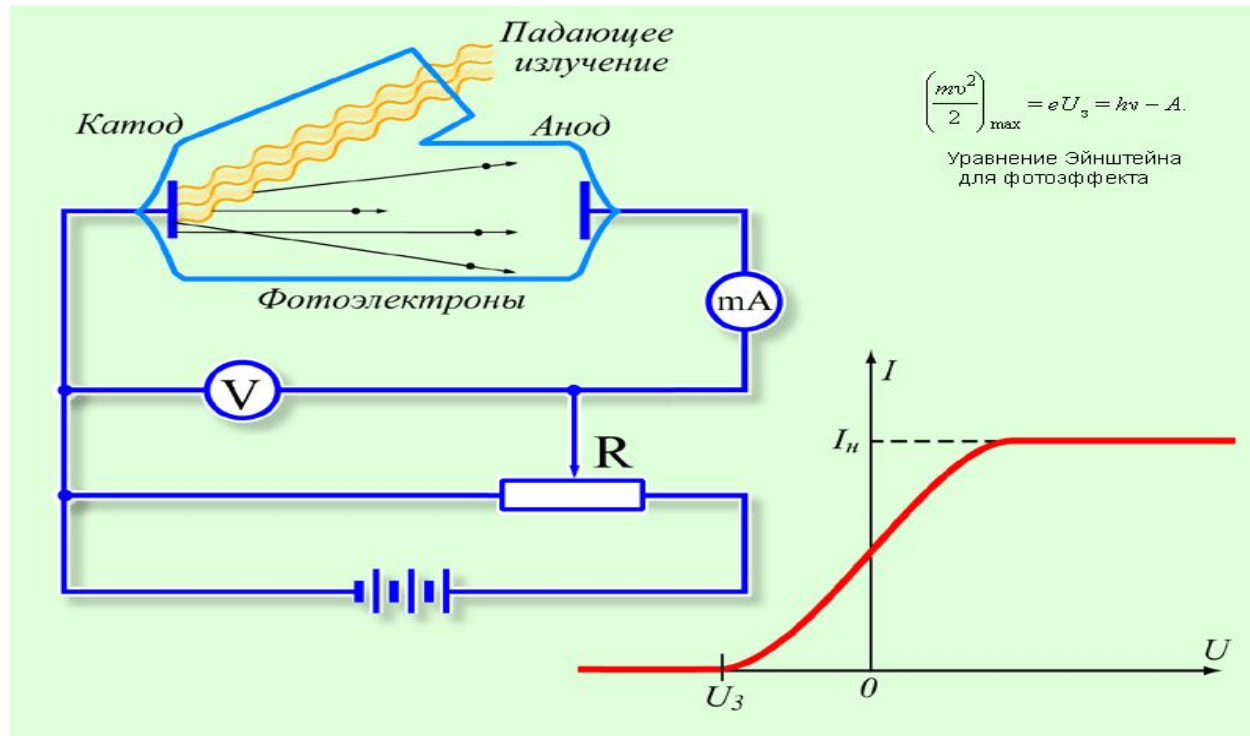
- Внешний фотоэффект – испускание электронов веществом под действием под действием падающего на него света. (Герц, 1887 г., А. Г. Столетов, 1888-1890 г.г., Ф. Ленард, 1900 г.)
- Как изучают фотоэффект: снимают вольт-амперную характеристику вакуумной лампы при облучении холодного катода светом фиксированной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

# Фотоэлектронная эмиссия

- **Фотоэлектронная эмиссия (фотоэффект)** заключается в «выбивании» электронов из металла при действии на него электромагнитного излучения.



# установка для изучения фотоэффекта



По вольт-амперной характеристике узнают:

число электронов, вырываемых из катода

в единицу времени ( $N = I_{\text{нас}}/e$ )

Максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$\frac{1}{2} mv^2 = eU_{\text{зад}}$$

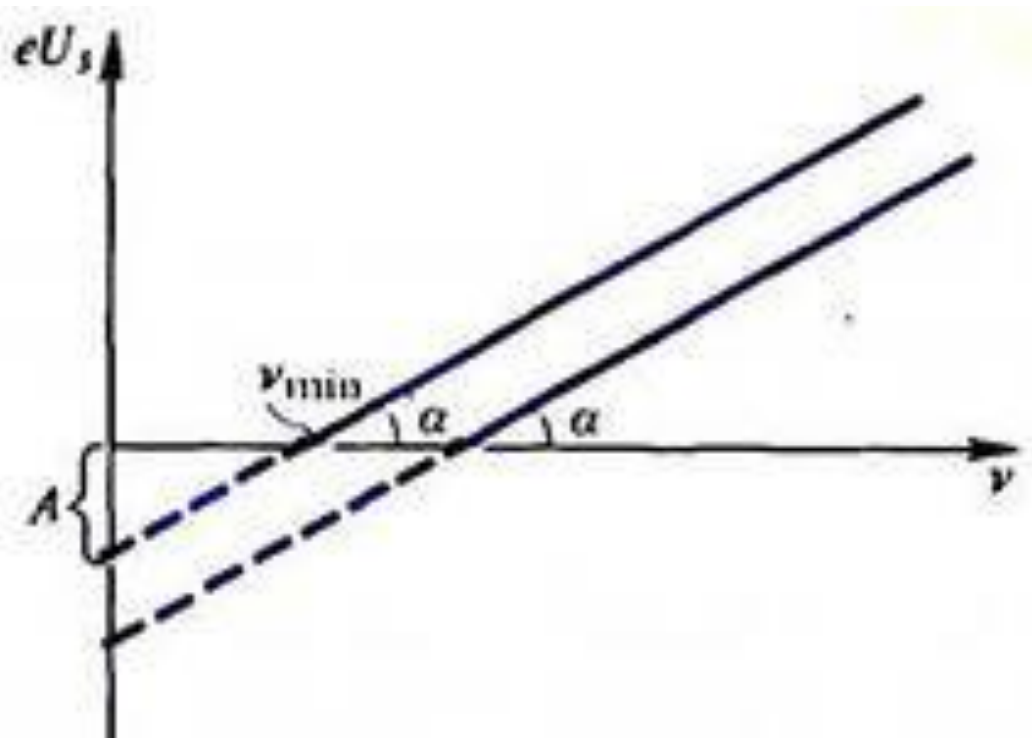
# Красная граница фотоэффекта

- Предельную частоту называют красной границей фотоэффекта.

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

- Работа выхода  $A$  зависит от рода вещества. Поэтому и предельная частота фотоэффекта для разных веществ различна.

Зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты  $U = U(\nu)$

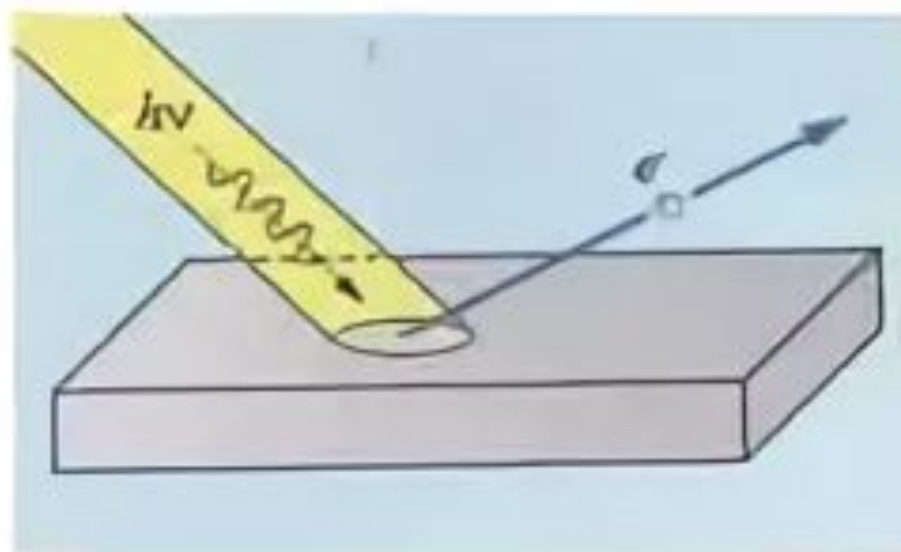


# Работа выхода

Минимальная работа, которую нужно совершить фотону для вырывания электронов из металла

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

$$h\nu_{\min} = A$$





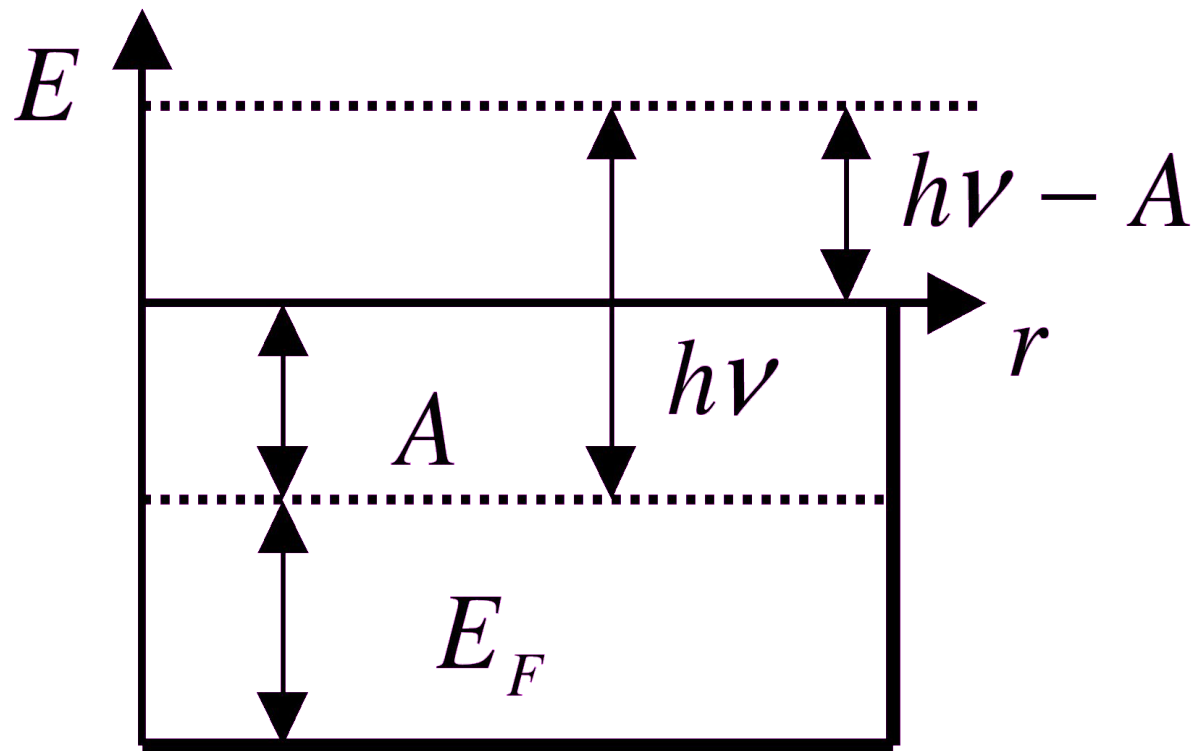
# Законы фотоэффекта (Столетова)

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  $\lambda > \lambda_{\max}$  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  $\lambda < \lambda_{\max}$ )

# 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 в веществе.

# Энергетическая схема фотоэффекта



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  $\omega_0$  определяется работой выхода

$$\hbar\omega_0 = A_{\text{вых}}$$

# Характерные величины

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

# Инерционность фотоэффекта $\Delta t \sim 10^{-12}$ с

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

# ФОТОН

Фотон ( $\gamma$ ) — это частица, несущая порцию энергии (квант энергии) электромагнитного излучения (введена физиком-химиком Гилбертом Ньютоном Льюисом).

фотон должен был поглощаться и испускаться материей. Фотоны ( $\gamma$ ) являются элементарными частицами. Они не имеют массы покоя и всегда движутся со скоростью света.

квантовая механика предлагает наилучшую модель, объясняющую фотоны.

Это справедливо для всех элементарных частиц. Поэтому они демонстрируют дуализм волна-частица. Это означает, что они обладают свойствами волн и частиц.

# ФОТОН

- Энергия фотона  $\varepsilon = \hbar\omega$
- Для любой частицы  $\varepsilon^2 - p^2c^2 = (mc^2)^2$
- Масса (покоя) фотона  $m = 0 \rightarrow$   
 $\varepsilon = pc$
- 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!



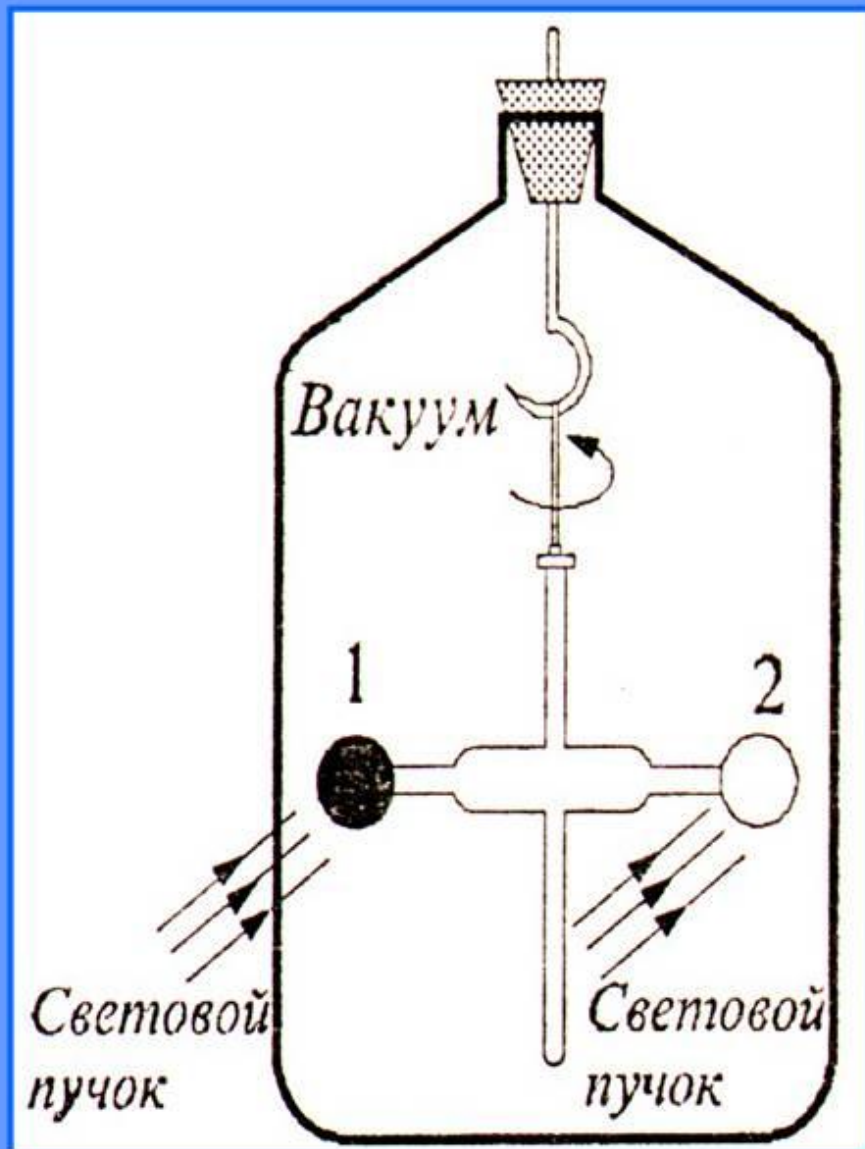
# Фотон – корпускула (частица) или волна?

- 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 для всех микрообъектов свойство**

# 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.

# фотоэффект на свободном электроне

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

энергии и импульса:

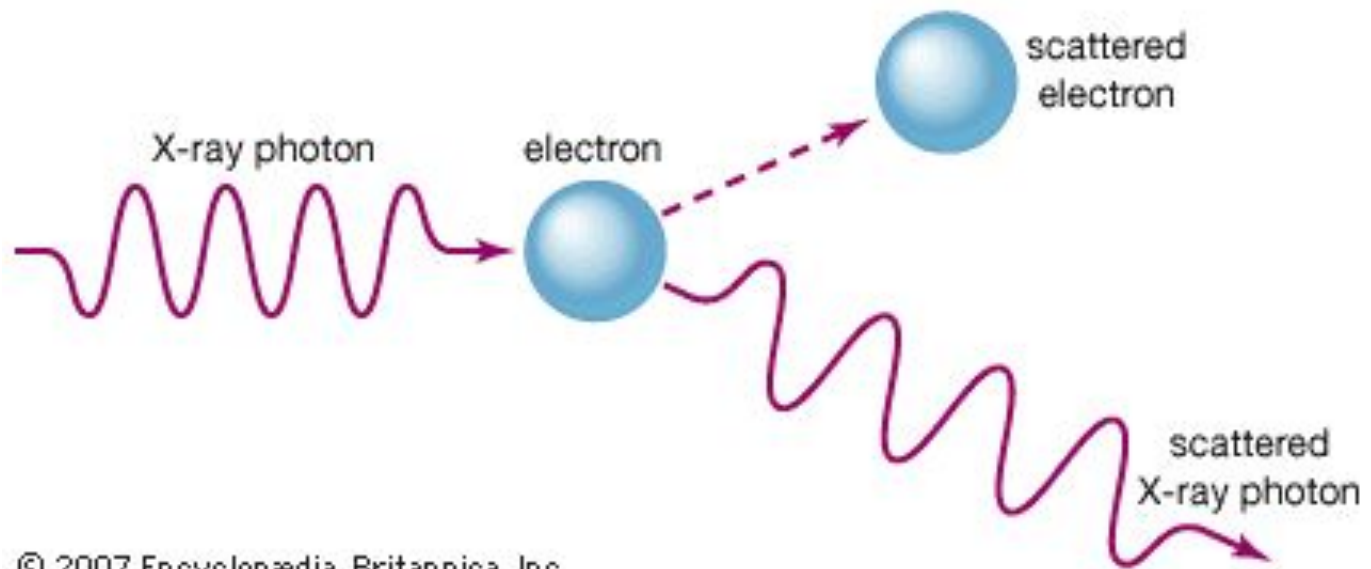
$$m_0 c^2 + pc = (m_0^2 c^4 + p^2 c^2)^{1/2} \rightarrow$$

$$p = 0$$

$$\varepsilon = pc = 0 \text{ – фотона нет}$$

Но(!) возможно упругое рассеяние фотонов на свободных электронах

# Эффект Комптона - упругое рассеяние фотона на свободном электроне



## Опыт Комптона (1922 г)

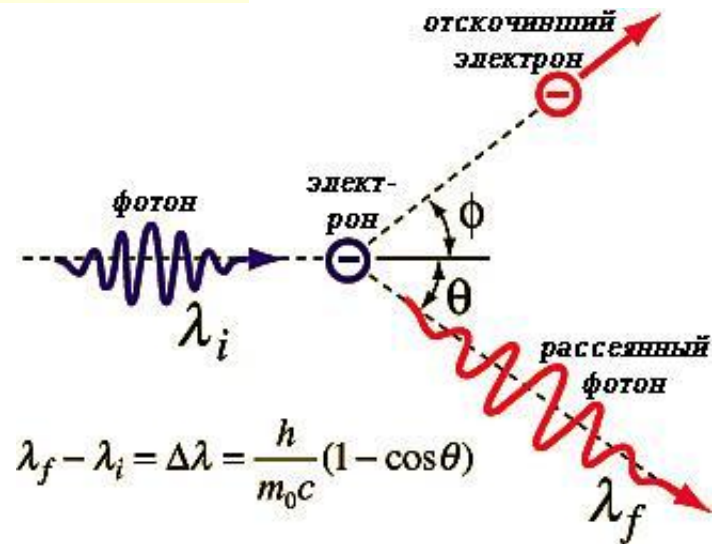
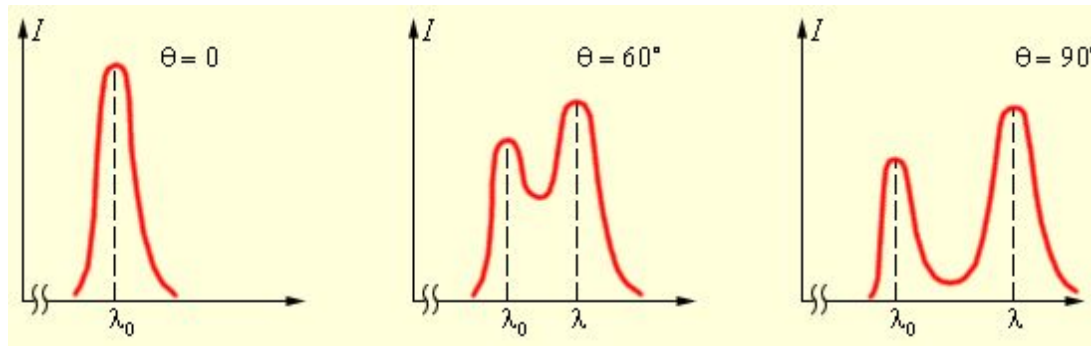
- Рассеяние рентгеновских лучей на веществе.
- Измерялась энергия (длины волн) фотонов, рассеянных под разными углами. (Кристалл - дифракционная решётка)
- Что получилось: в рассеянном свете кроме несмещённой линии  $\lambda_0$  наблюдалась линия  $\lambda$  с большей длиной волны:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \Lambda_c (1 - \cos\theta) = 2\Lambda_c \sin^2 \frac{1}{2}\theta$$

$$\Lambda_c = \frac{2\pi\hbar}{m_e c} = 2,43 \cdot 10^{-10} \text{ см} -$$

КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ.

# Результаты эксперимента



$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta)$$

