

Лекция № 7

Корпускулярные свойства света

**Алексей Викторович
Гуденко**

31/03/2017

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

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

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

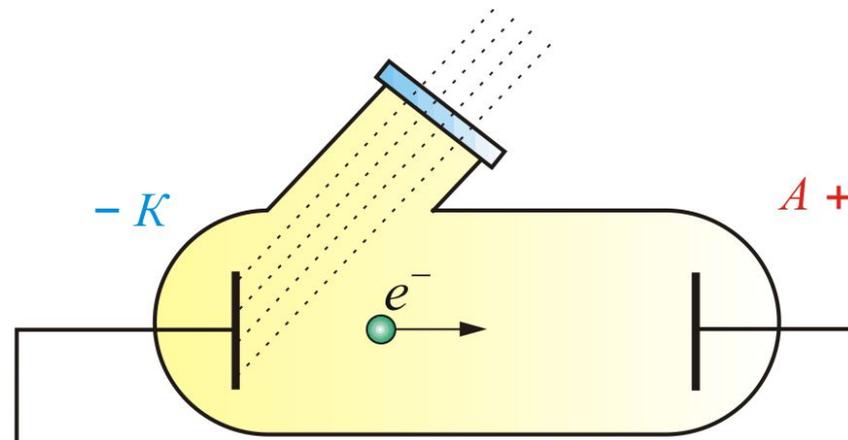
$$h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ эВ с}$$

Фотоэлектрический эффект

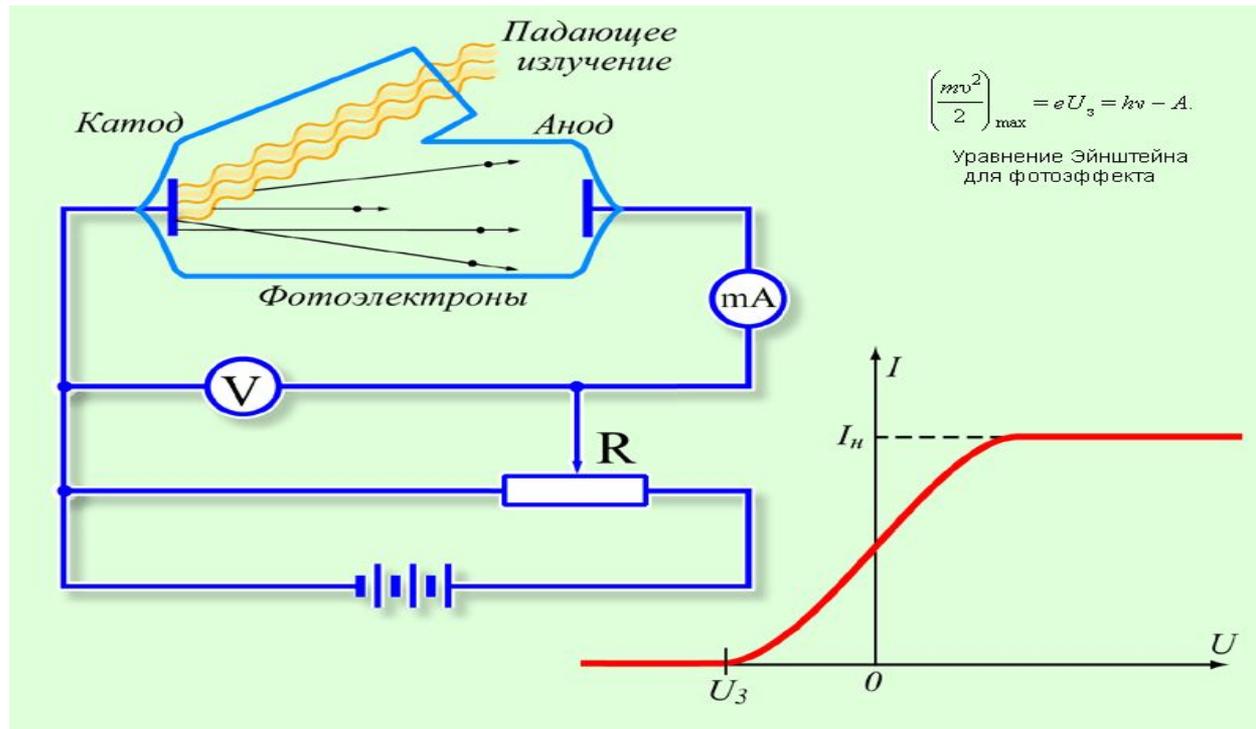
- Внешний фотоэффект – испускание электронов веществом под действием под действием падающего на него света. (Герц, 1887 г., А. Г. Столетов, 1888-1890 г.г., Ф. Ленард, 1900 г.)
- Как изучают фотоэффект: снимают вольт-амперную характеристику вакуумной лампы при облучении холодного катода светом фиксированной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

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

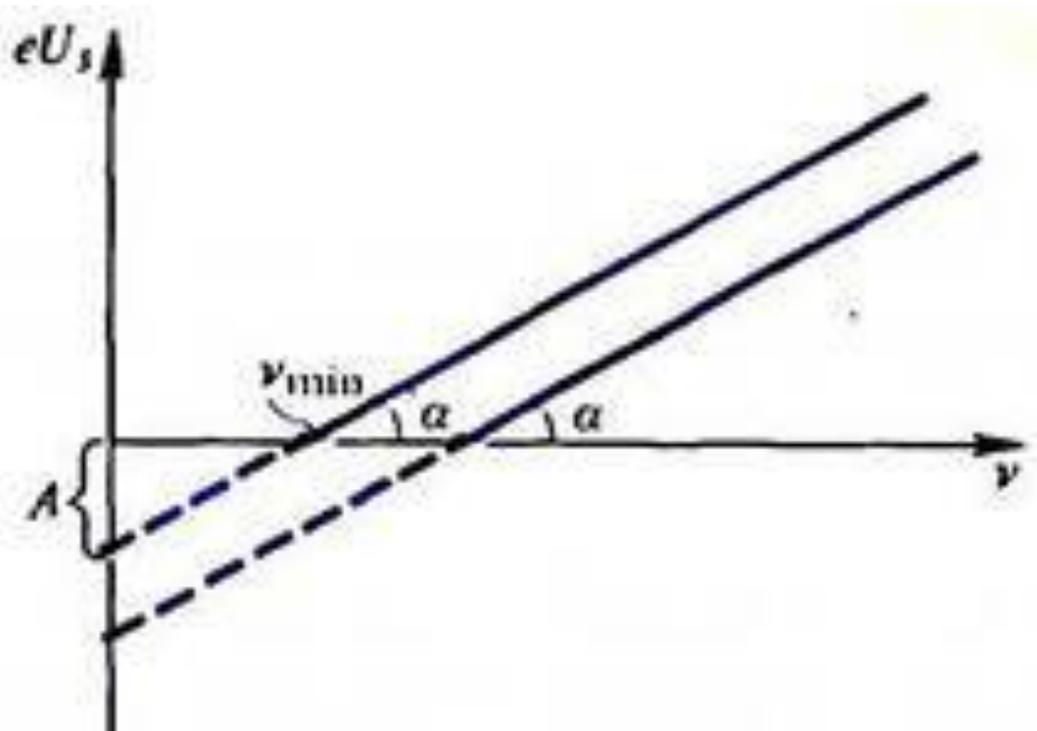
Красная граница фотоэффекта

- 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 $U = U(\nu)$

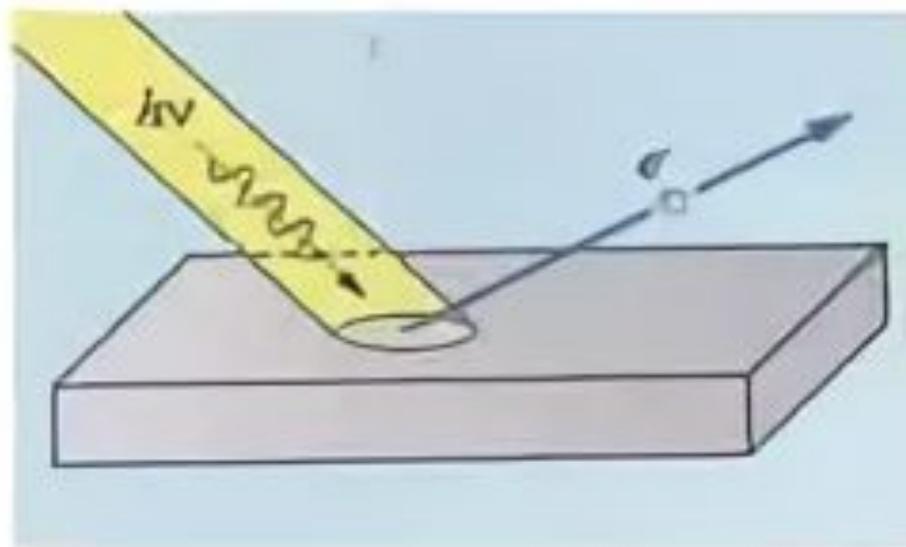


Работа выхода

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

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

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



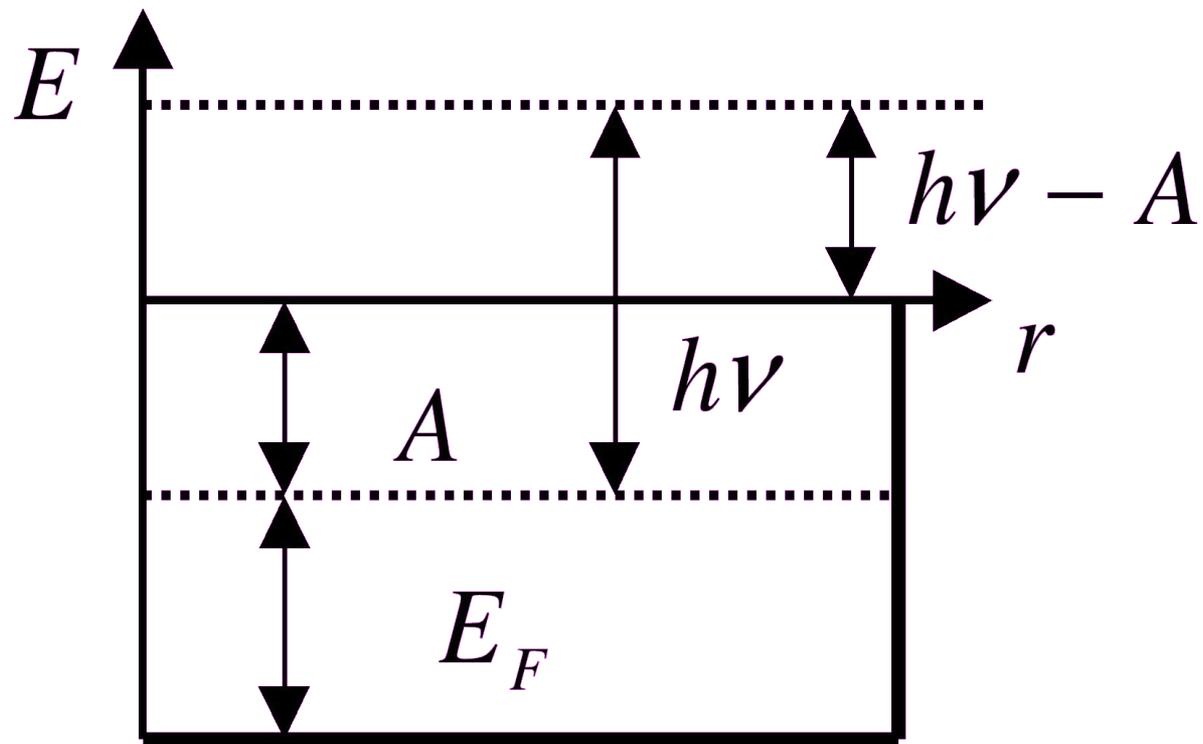
Законы фотоэффекта (Столетова)

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 ω_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 (γ) — это частица, несущая порцию энергии (квант энергии) электромагнитного излучения (введена физиком-химиком Гилбертом Ньютоном Льюисом).

фотон должен был поглощаться и испускаться материей. Фотоны (γ) 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!

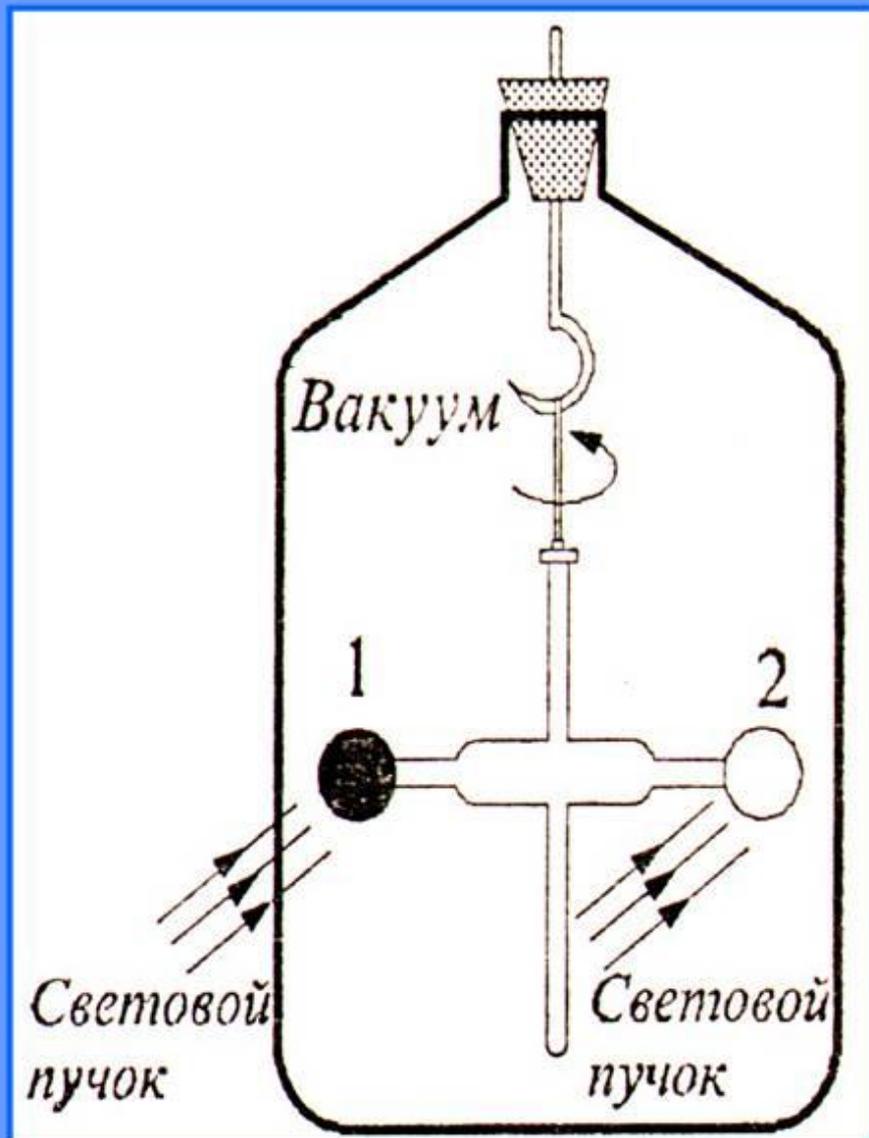
Фотон – корпускула (частица) или волна?

- 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:

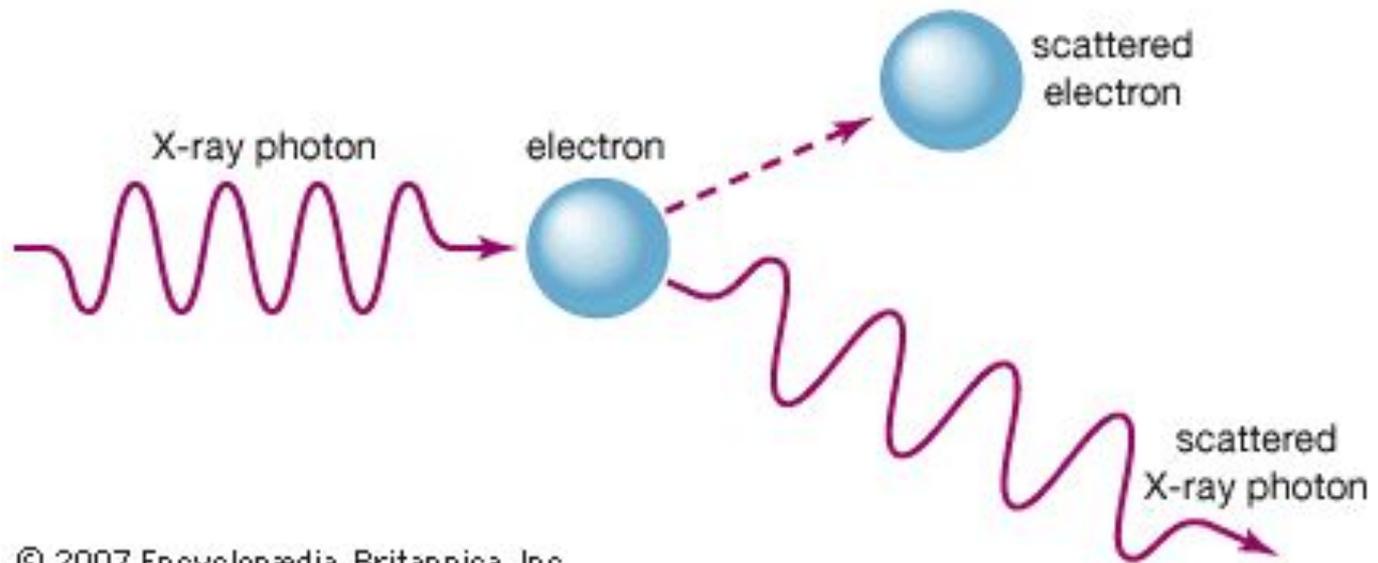
$$m_0 c^2 + pc = (m_0^2 c^4 + p^2 c^2)^{1/2} \rightarrow$$

$$p = 0$$

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

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 λ_0 наблюдалась линия λ с большей длиной волны:

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

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

КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ.

Результаты эксперимента

