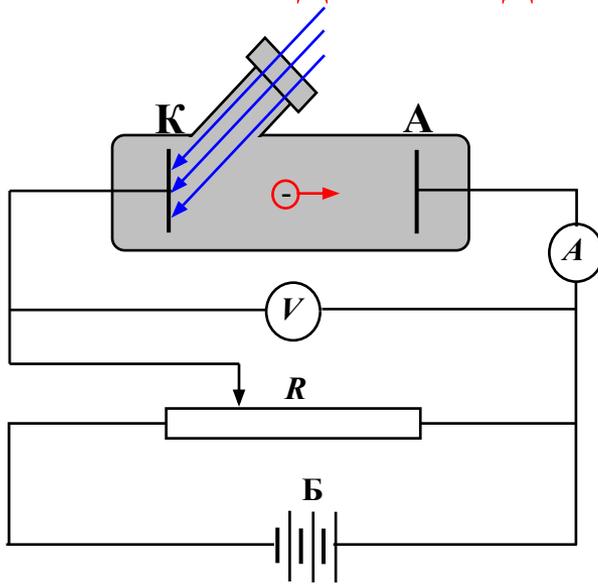


Вопросы:

- 1. Фотоэлектрический эффект.**
- 2. Фотоны и их свойства. Эффект Комптона.**
- 3. Световое давление.**

Квантовая гипотеза Планка, решившая задачу теоретического описания излучения абсолютно черного тела, получила дальнейшее развитие при объяснении *фотоэлектрического эффекта (фотоэффекта)*.

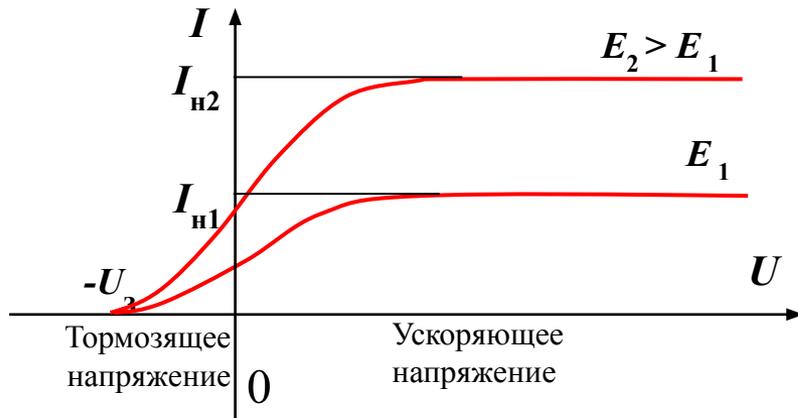
Фотоэффектом (внешним фотоэффектом) называется испускание электронов веществом под действием света (электромагнитного излучения). Внешний фотоэффект наблюдается для металлов.



Экспериментальная установка позволяет получить *вольт-амперную характеристику фотоэффекта* – зависимость силы фототока I от напряжения U между электродами.

Схема исследования фотоэффекта

Вольт-амперные характеристики фотоэффекта



1. $I = I(U)$ при различных энергетических освещенностях катода ($E_1 \neq E_2$) и постоянной частоте света ($\nu = const.$)

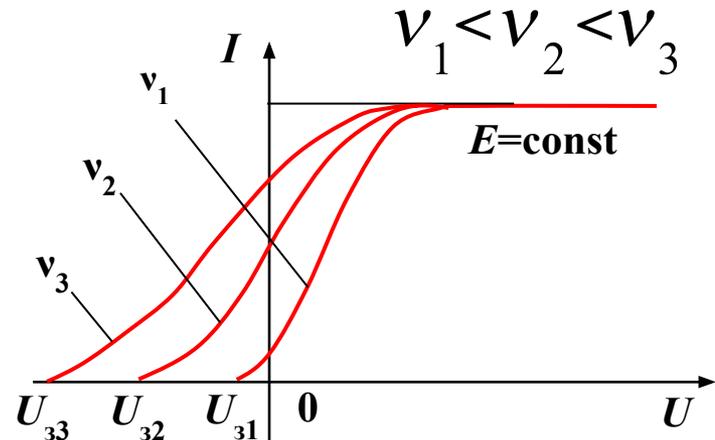
Особенности:

- наличие тока насыщения $I_H = e \cdot \frac{dN_e}{dt}$
- наличие задерживающего напряжения U_3 .

$$\frac{m_e U_{\max}^2}{2} = eU_3$$

2. $I = I(U)$ при различных частотах ($\nu_1 \neq \nu_2 \neq \nu_3$) и постоянной энергетической освещенности катода ($E = const.$)

Особенность: $U_3 \sim \nu.$



Законы фотоэффекта (законы Столетова)

1. При фиксированной частоте падающего света ($\nu = \text{const.}$) сила фототока насыщения прямо пропорциональна энергетической освещенности катода E .
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте света ν и не зависит от энергетической освещенности катода E .
3. Фотоэффект не возникает, если частота света меньше некоторой характерной для каждого металла величины $\nu_{\text{кр}}$, называемой *красной границей фотоэффекта*, зависящей от химической природы вещества и состояния его поверхности.



Александр
Григорьевич
Столетов
(1839 – 1896)

Законы фотоэффекта невозможно объяснить в рамках классической волновой теории света.

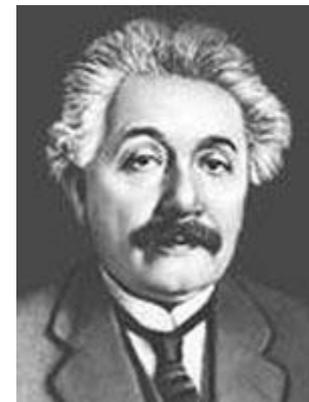
Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

В 1905 г. А.Эйнштейн, опираясь на квантовую гипотезу М.Планка, предложил *квантовую теорию фотоэффекта*, согласно которой свет частотой ν не только излучается, но также распространяется и поглощается веществом в виде отдельных порций – квантов с энергией $h\nu$.

$$h\nu = A + \frac{m_e v_{\max}^2}{2} \quad (1)$$

A – работа выхода электронов, эВ .

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$



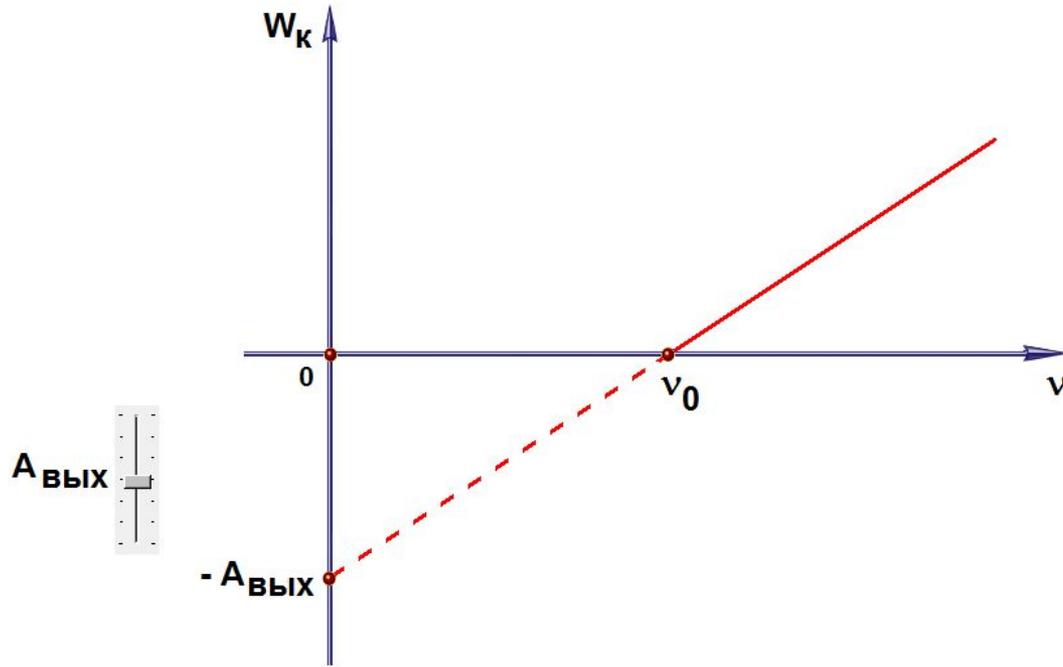
Альберт Эйнштейн
(1879 – 1955)

Физический смысл уравнения Эйнштейна: это закон сохранения энергии применительно к единичному однофотонному акту фотоэффекта.

Уравнение Эйнштейна легко объясняет законы фотоэффекта.

- 1. По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном, поэтому число вырванных фотоэлектронов (фототок насыщения) должно быть пропорционально числу поглощенных фотонов, т.е. энергетической освещенности (1-ый закон).**
- 2. Из уравнения непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от энергетической освещенности (2-ой закон).**
- 3. Из уравнения вытекают формулы для красной границы фотоэффекта (3-ий закон):**

$$v_{\text{кр}} = \frac{A}{h} \quad \lambda_{\text{кр}} = \frac{c}{v_{\text{кр}}} = \frac{hc}{A}$$



W_k – максимальная кинетическая энергия электронов;
 $\nu_0 = \nu_{кр}$ – красная граница по частоте.

Другие формы записи уравнения Эйнштейна

$$hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{кр}} \right) = \frac{m_e v_{max}^2}{2} \quad (2)$$

$$h(\nu - \nu_{кр}) = eU_3 \quad (3)$$

Применение фотоэффекта



Фотоэлементы и фотодатчики – приемники излучения, преобразующие энергию излучения в электрическую энергию (используются в экспонометрах, микрокалькуляторах, фотореле, фотоумножителях и т.д.)



Солнечная батарея спутника



Дом с крышей из солнечных батарей

Энергия, масса и импульс фотона

Согласно квантовым представлениям Планка и Эйнштейна, свет является потоком особых световых частиц (квантов электромагнитного излучения), получивших название *фотонов*.

$$\varepsilon_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{— энергия фотона.}$$

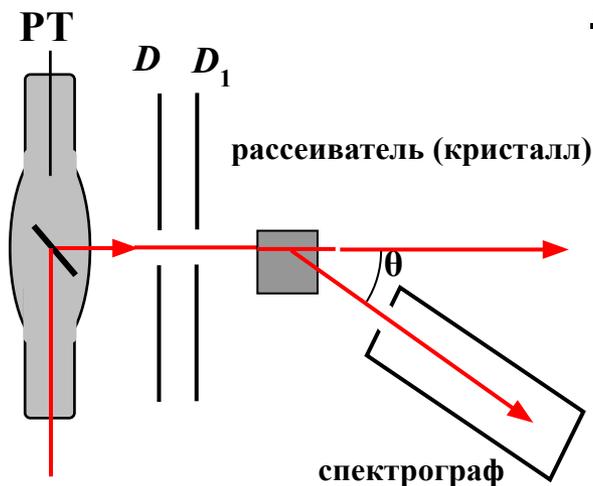
$$\text{Поскольку } \varepsilon_{\phi} = m_{\phi} c^2 \Rightarrow m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda} \quad \text{— масса фотона.}$$

Из релятивистской формулы $m_{\phi} = \frac{m_{\phi 0}}{\sqrt{1 - (v_{\phi} / c)^2}}$ следует:
 $m_{\phi 0} = 0$ и $v_{\phi} = c$.

Фотоны – это частицы с особыми свойствами, имеющие нулевую массу покоя и существующие только распространяясь со скоростью $c = 300 \text{ Мм/с}$ в любой среде.

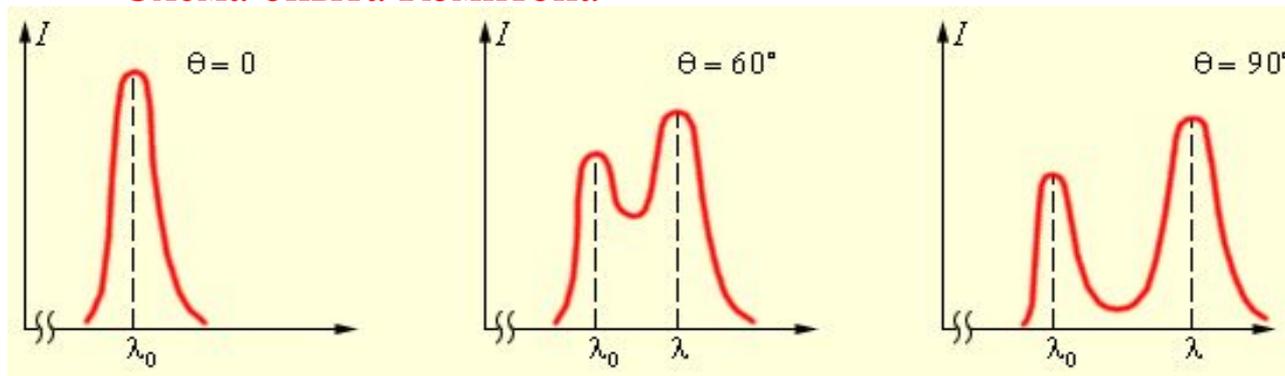
$$p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad \text{— импульс фотона.}$$

Эффект Комптона



Одним из доказательств существования фотонов является *эффект Комптона* – упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения на электронах, сопровождающееся увеличением длины волны излучения.

Схема опыта Комптона

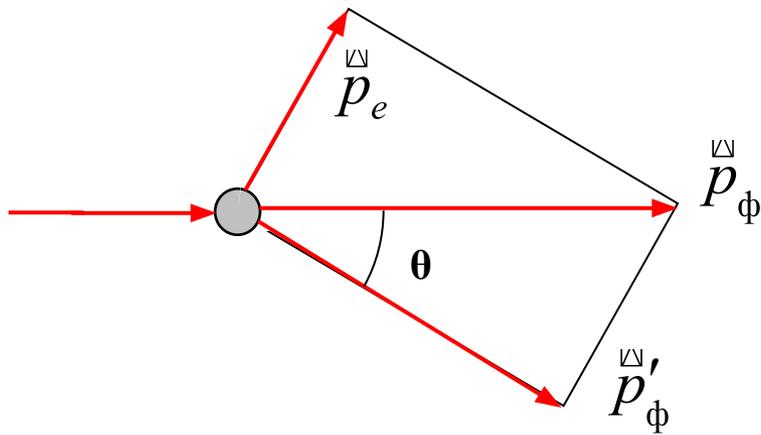


Спектры рассеянного излучения



Артур Комpton
(1892 – 1962)

Эффект Комптона не укладывается в рамки волновой теории, согласно которой длина волны излучения не должна изменяться при рассеянии.



Расчетная схема

Закон сохранения энергии:

$$h \frac{\tilde{n}}{\lambda_0} + m_0 c^2 = h \frac{\tilde{n}}{\lambda} + m c^2$$

Закон сохранения импульса:

$$p_e^2 = p_\phi^2 + p'_\phi^2 - 2 p_\phi p'_\phi \cdot \cos \theta$$

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = 2 \lambda_c \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad - \text{формула А.Комптона.}$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \text{ \AA} \quad - \text{комптоновская длина волны электрона.}$$

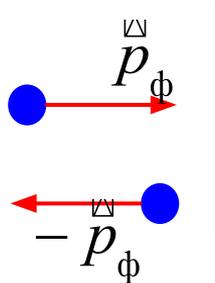
Формула Комптона подтверждает опытные данные о том, что величина $\Delta \lambda$ не зависит от природы рассеивающего вещества, а определяется только значением угла θ .

Световое давление

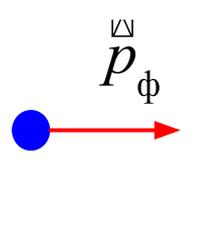
Поскольку фотоны при соударении с поверхностью передают ей свой импульс, то, в соответствии со 2-ым законом Ньютона, свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление.

Впервые экспериментально световое давление на твердые тела было обнаружено и измерено русским физиком П.Н.Лебедевым в 1901 г.

Отражение



Поглощение



$$P = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p_{\phi} \cdot \Delta N_{\phi}}{S \cdot \Delta t} \quad - \text{давление света.}$$

$$(\Delta p_{\phi})_{\text{отр}} = \frac{2h\nu}{c}; \quad (\Delta p_{\phi})_{\text{погл}} = \frac{h\nu}{c}$$

Схема отражения и поглощения фотона

ρ – коэффициент отражения света.

$$0 \leq \rho \leq 1$$

$$P = (1 - \rho) \cdot \frac{h\nu}{Sc} \cdot \frac{\Delta N_{\phi}}{\Delta t} + \rho \cdot \frac{2h\nu}{Sc} \cdot \frac{\Delta N_{\phi}}{\Delta t} = \frac{E}{c} \cdot (1 + \rho)$$

$$E = \frac{h\nu}{S} \cdot \frac{\Delta N_{\phi}}{\Delta t} \quad \text{– энергетическая освещенность поверхности.}$$

$$[E] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$P = \frac{E}{c} \cdot (1 + \rho) = w \cdot (1 + \rho)$$

$$w = \frac{E}{c} \quad \text{– объемная плотность энергии излучения.}$$

$$[w] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$



**Петр Николаевич
Лебедев
(1866 – 1912)**