

ФОТОНЫ

Фотоэффект

Различают фотоэффект **внешний, внутренний, вентильный и многофотонный.**

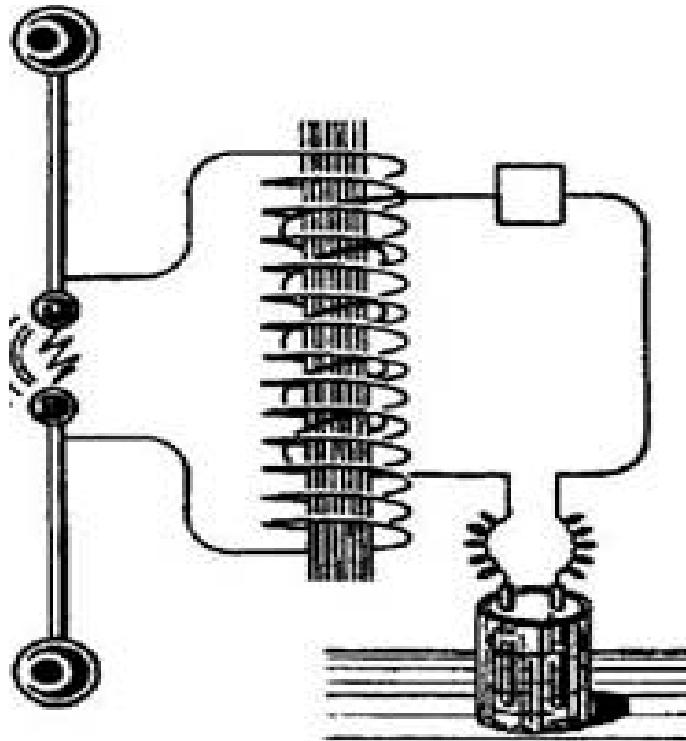
Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

Многофотонный фотоэффект возможен, если интенсивность света очень большая (при использовании лазерных пучков).

Фотоэффект

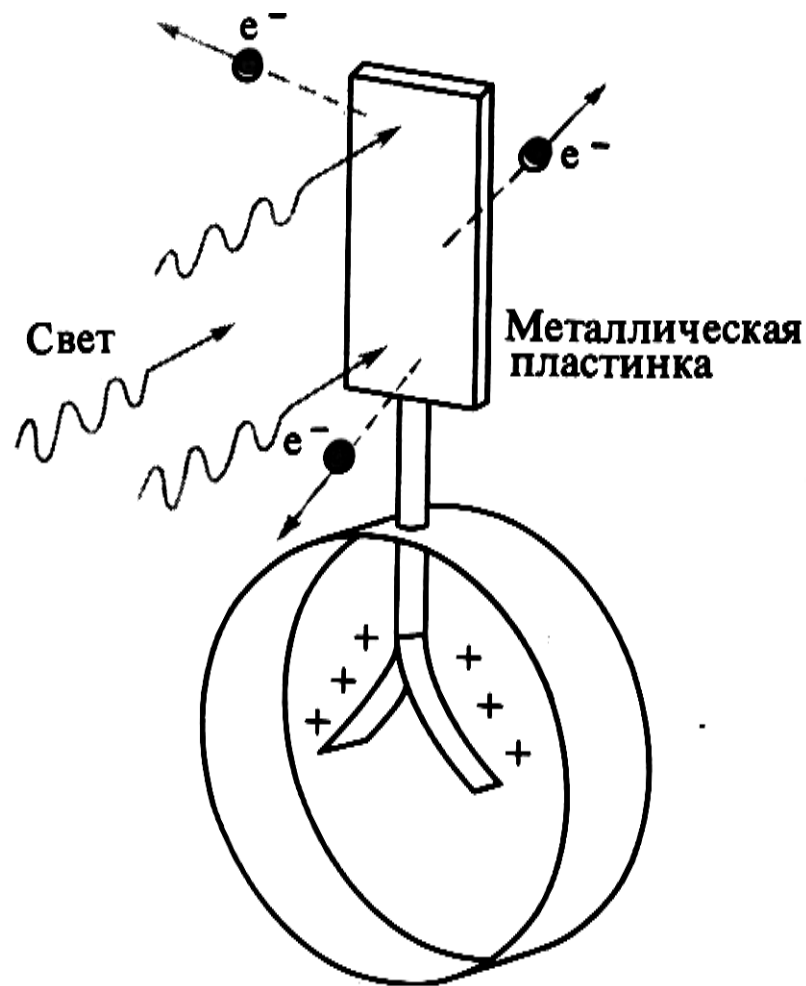
Открыт Г. Герцем в 1887 – проскакивание искры между цинковыми шариками разрядника заметно увеличивается, если один из шариков осветить УФ лучами.



Фотоэффект

Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым **А.Г. Столетовым**.

Нейтральный электроскоп, соединен с металлической пластинкой. При освещении пластинки светом из нее выбиваются фотоэлектроны, и листочки заряжаются положительно

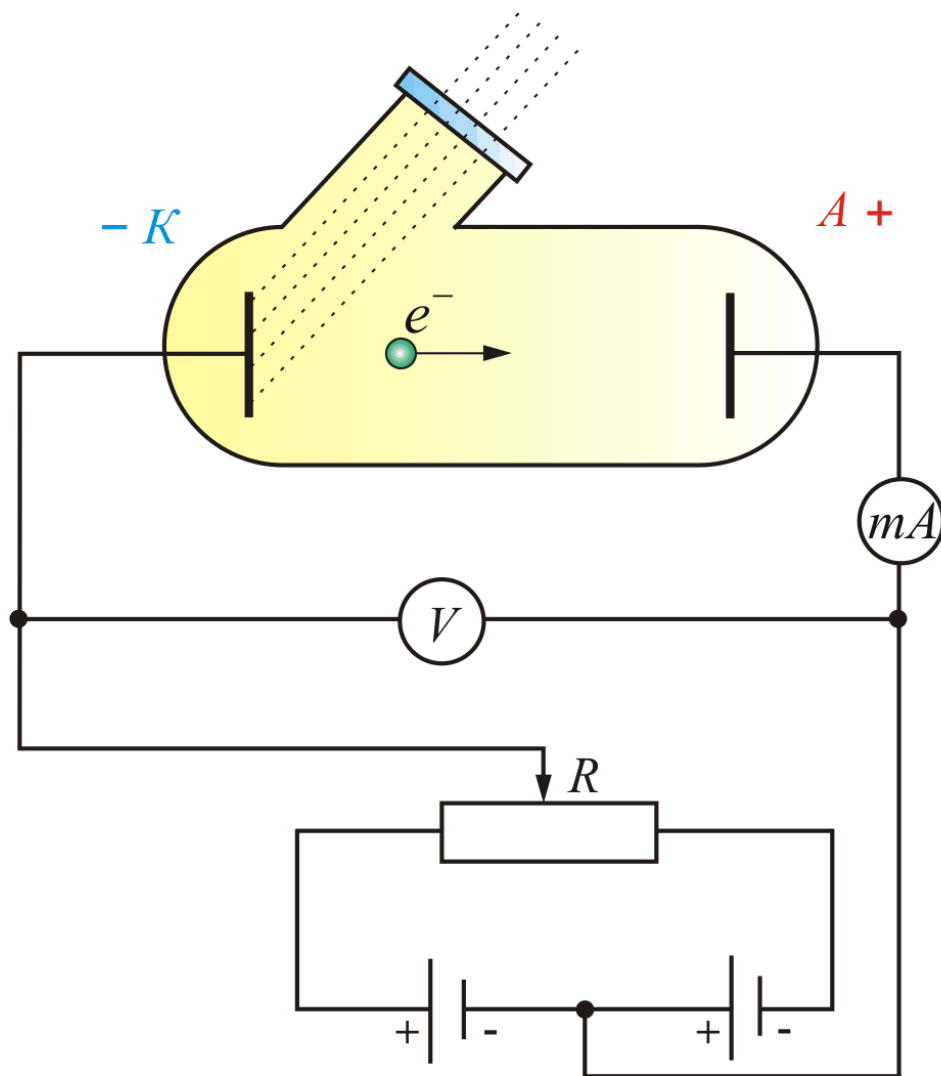


Фотоэффект

Закономерности, установленные Столетовым:

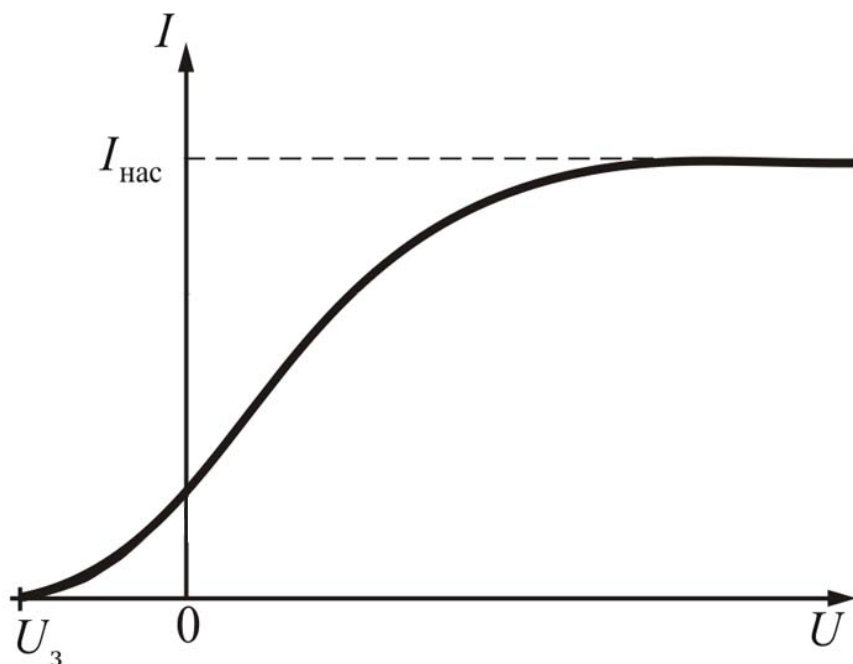
- 1) Наиболее эффективное действие оказывает ультрафиолетовое излучение.
- 2) Под действием света вещество теряет только отрицательные заряды.
- 3) Сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности.
- 4) Безинерционность процесса.

Фотоэффект



Свет проникает через кварцевое окошко в evacuated баллон и освещает катод, изготовленный из исследуемого материала. Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду. В результате в цепи прибора течет фототок.

Фотоэффект



Максимальное значение тока $I_{\text{нас.}}$ – фототок насыщения – определяется таким значением U , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода:

$$I_{\text{нас.}} = ne,$$

где n – число электронов испускаемых катодом в 1 с.

Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить *задерживающее напряжение* $U_з$

$$\frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} = eU_з$$

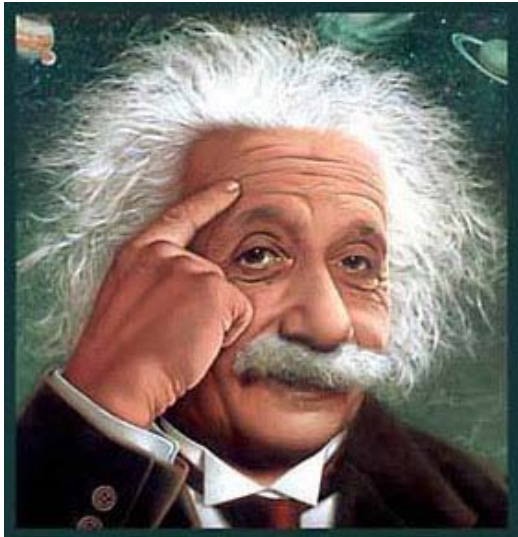
Законы фотоэффекта

1-ый закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света.

2-ой закон Столетова: Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .

3-ий закон Столетова: Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Формула Эйнштейна



Объяснение наблюдаемых экспериментально закономерностей было дано Эйнштейном:

Свет не только испускается (Планк), но и распространяется, и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых :

$$\varepsilon = h\nu$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = \frac{mv_{\max}^2}{2} + A.$$

A – работа выхода электронов.

Формула Эйнштейна

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

1. Каждый квант поглощается только одним электроном.

2. Увеличение интенсивности света означает увеличение числа налетающих фотонов. Как следствие, число вырванных фотоэлектронов пропорционально интенсивности света (I закон фотоэффекта).

3. При увеличении частоты падающего света максимальная кинетическая энергия электронов возрастает линейно по формуле Эйнштейна (II закон фотоэффекта).

$$\frac{m\nu^2}{2} = h\nu - A$$

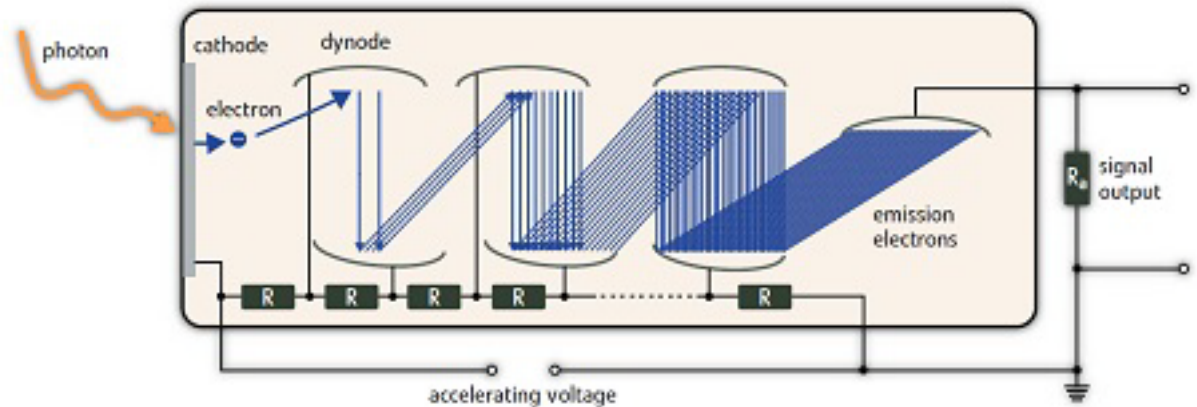
4. Если частота ν меньше частоты ν_0 , при которой $h\nu_0 = A$, то выбивание электронов с поверхности не происходит (III закон фотоэффекта).

$$\frac{m\nu^2}{2} = h\nu - A$$
$$eU_s = h(\nu - \nu_0)$$

Многофотонный фотоэффект

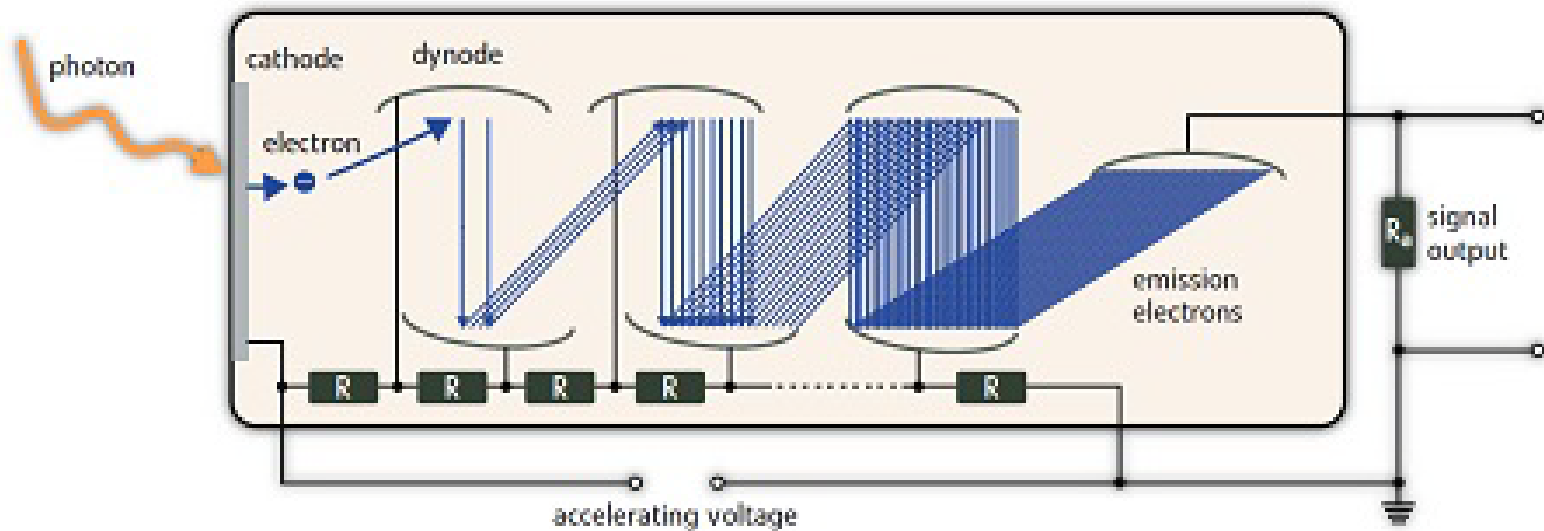
Если интенсивность света очень большая (например, лазерные пучки), то возможен многофотонный (нелинейный) фотоэффект, при котором электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от N фотонов ($N = 2 - 7$). Уравнение Эйнштейна для многофотонного фотоэффекта:

$$N h \nu = A + \frac{m v^2}{2}$$



Электрон может приобрести энергию, необходимую для выхода из вещества, даже под действием света с частотой меньшей $\nu_{кр}$ однофотонного эффекта. Красная граница смещается в область меньших частот (больших λ).

Многофотонный фотоэффект



[Фотоэлектронные умножители](#)

Фотоэффект

Внутренний фотоэффект – вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводников и диэлектриков из связанных состояний в свободные без вылета наружу. Следствием является появление фототока.

Вентильный фотоэффект (разновидность внутреннего) – возникновение э.д.с. (фото-э.д.с.) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла при отсутствии внешнего электрического поля. Применение – солнечные батареи.

Фотонная теория света.

Масса, энергия и импульс фотона

В 1905г. Эйнштейн выдвинул смелую идею, обобщавшую гипотезу квантов, и положил ее в основу новой теории света (квантовой теории фотоэффекта).

Согласно Эйнштейну свет с частотой ν не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых

$$\varepsilon_0 = h\nu.$$

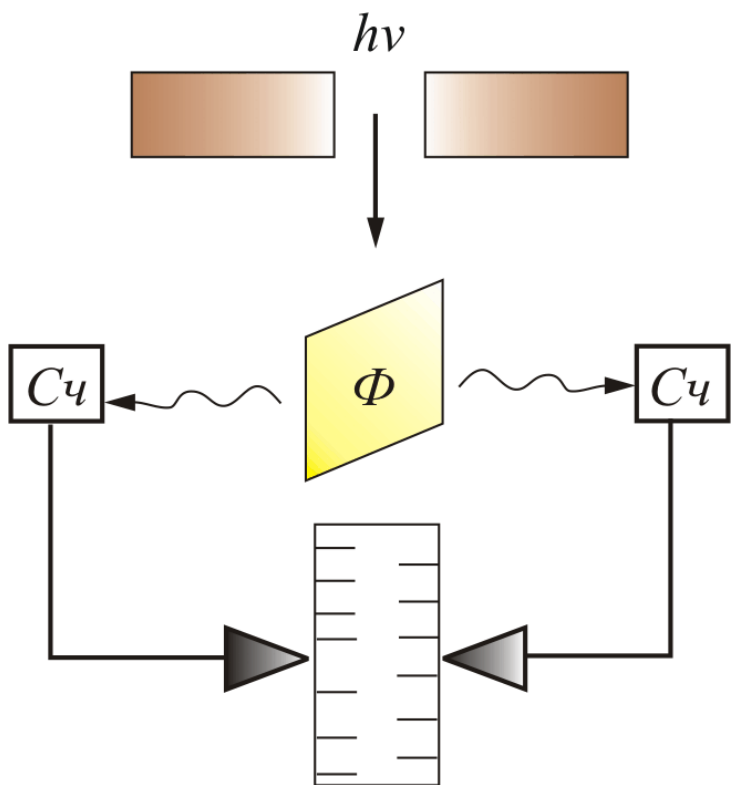
Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью c распространения света в вакууме

Кванты электромагнитного излучения получили название фотонов.

Фотонная теория света.

Масса, энергия и импульс фотона

Опыт Боте (1925), подтверждающий гипотезу Эйнштейна:



Тонкая металлическая фольга облучалась рентгеновским излучением низкой интенсивности. При этом фольга сама становилась источником слабого вторичного излучения. Исходя из классических волновых представлений, это излучение должно распределяться в пространстве равномерно во всех направлениях. В этом случае два счётчика, находившиеся слева и справа от фольги, должны были фиксировать его одновременно. Однако результат опыта оказался прямо противоположным: излучение фиксировалось либо правым, либо левым счётчиком и никогда обоими одновременно. Следовательно, поглощение идёт отдельными квантами.

Масса, энергия и импульс фотона

Фотон обладает энергией $W = h\nu = h(c/\lambda)$.

Фотон обладает инертной массой:

$$W = mc^2 \Rightarrow m_{\phi} = W/c^2 = hc/\lambda c^2;$$

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

Фотон движется со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Подставим это значение скорости в выражение:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-1}} = \frac{m_0}{0} \rightarrow \infty.$$

Фотон – частица, не обладающая массой покоя потому, что она может существовать только двигаясь со скоростью света c .

Масса, энергия и импульс фотона

Релятивистские выражения (1) для импульса:
$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

и (2) для энергии:
$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Отсюда:
$$E = \frac{p}{v} c^2 \quad \Rightarrow \quad p = \frac{E}{c^2} v \Rightarrow p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

$$h = \frac{\hbar}{2\pi}$$

$$\frac{\nu}{2\pi} = \omega \quad p = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} \quad k = \frac{\omega}{c} \quad \text{— волновое число}$$

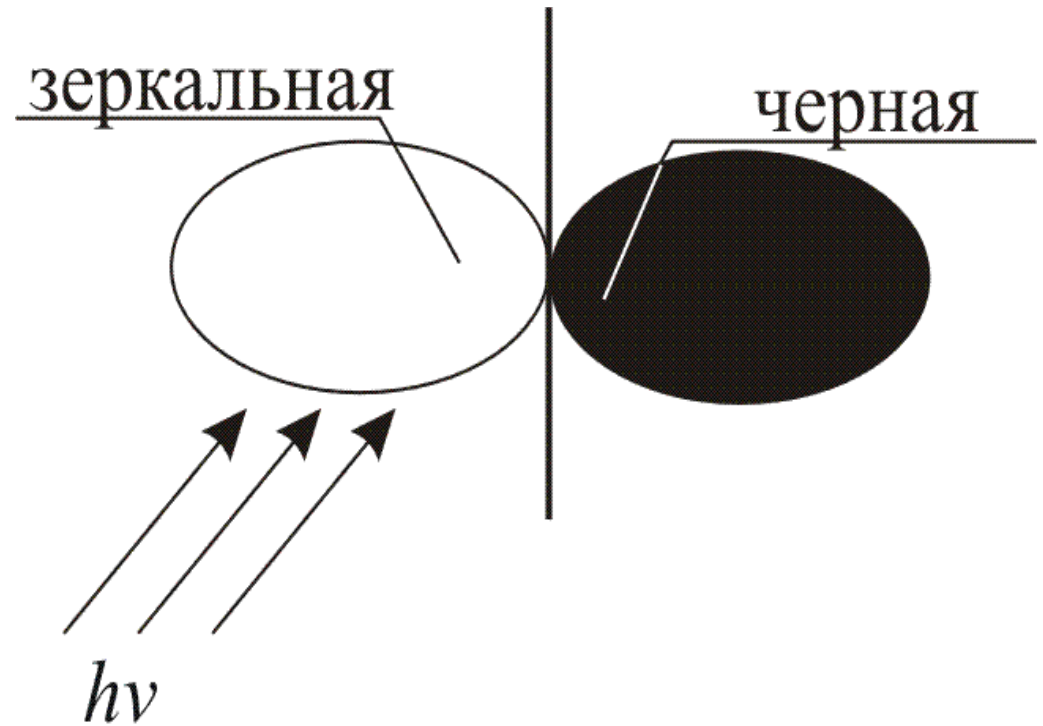
$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

\vec{k} — волновой вектор фотона.

Давление света

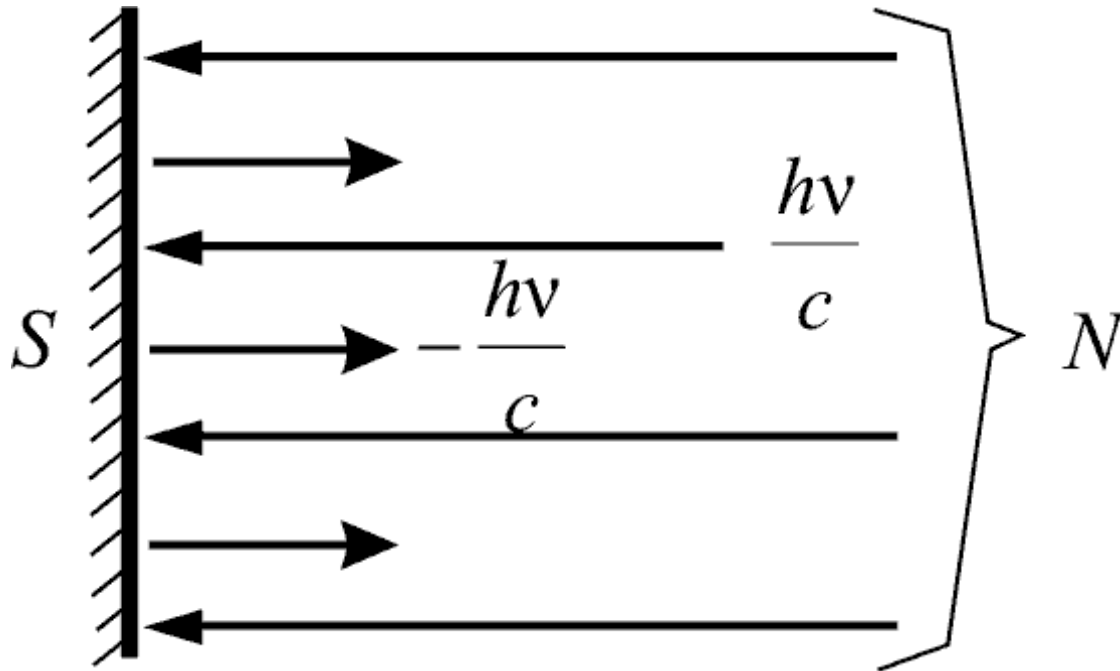
Исследовано Лебедевым П.Н. в 1901 году.

В своих опытах он установил, что давление света зависит от интенсивности света и от отражающей способности тела.



Давление света

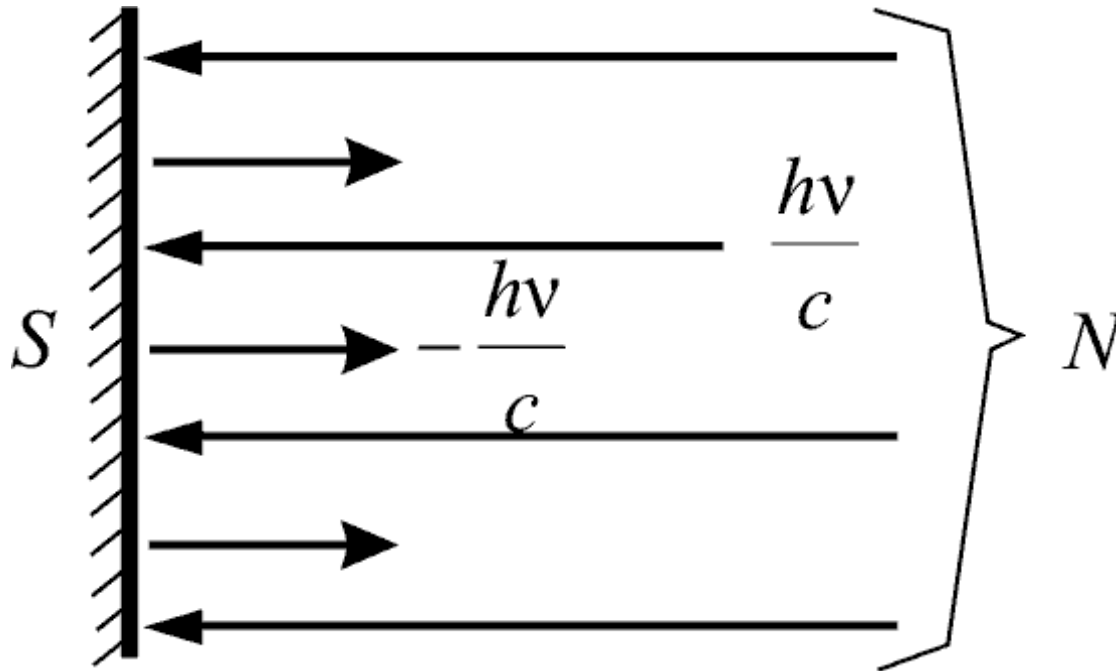
На тело площадью S падает световой поток с энергией $E = N h \nu$
где N – число квантов.



ρN - квантов отразится от поверхности;
 $(1 - \rho)N$ – поглотится,
 ρ – коэффициент отражения.

Давление света

Каждый поглощенный фотон передаст телу импульс $p_n = \frac{h\nu}{c}$



Каждый отраженный фотон передаст телу импульс:

$$p_{\text{отр}} = \frac{2h\nu}{c}$$

Давление света

Если тело зеркально отражает, то $\rho = 1$ и $p = 2w$

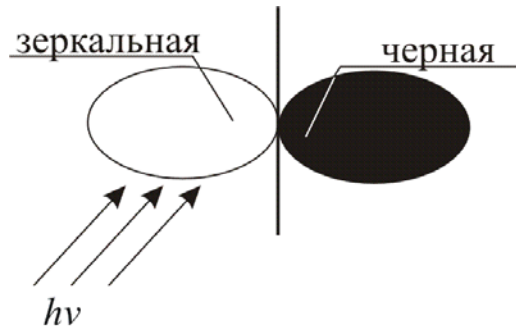
Если полностью поглощает (абсолютно черное тело) $\rho = 0$, $p = w$

Т.о. световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное.

Из корпускулярной теории электромагнитного излучения следует, что световое излучение оказывает давление на материальные предметы, причем величина давления пропорциональна объемной плотности энергии излучения:

$$p = w(1 + \rho)$$

Эксперименты прекрасно подтверждают этот вывод:



Корпускулярно-волновой дуализм

Корпускулярные характеристики фотона: масса, импульс, энергия.

Волновые характеристики света: частота.

Следовательно, свет обладает **корпускулярно-волновым дуализмом**.

Вероятность того, что фотон будет обнаружен в пределах объема dV :

$$dP = \chi A^2 dV$$

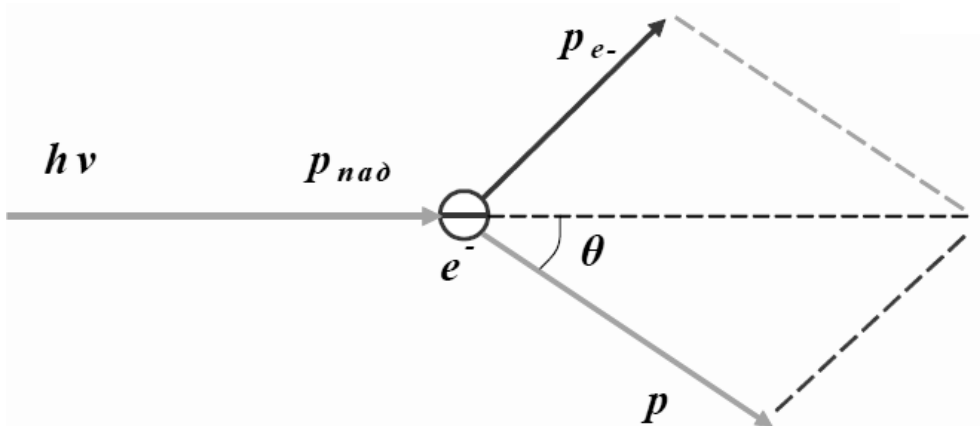
Следовательно, распределение фотонов по поверхности, на которую падает свет, должно иметь статистический характер.

Эффект Комптона

Упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентген и γ -излучение) на свободных или слабосвязанных электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.

$$\Delta \lambda = \lambda_{\text{рассеян. изл.}} - \lambda_{\text{пад. изл.}} = 2 \lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

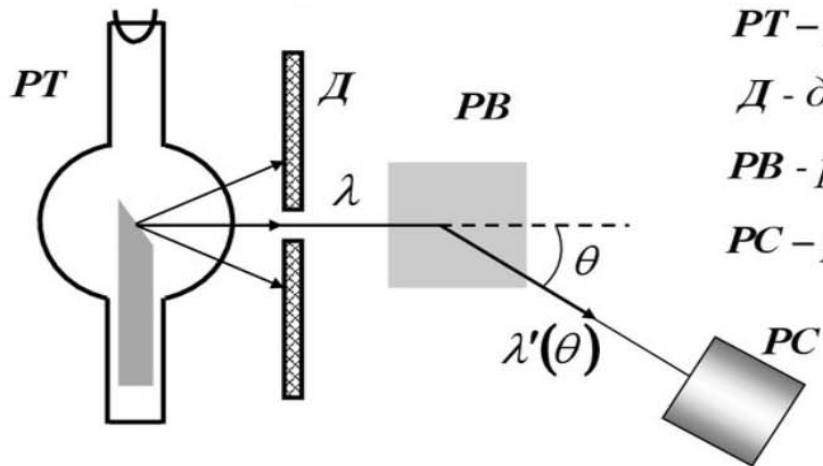
θ – угол рассеяния.



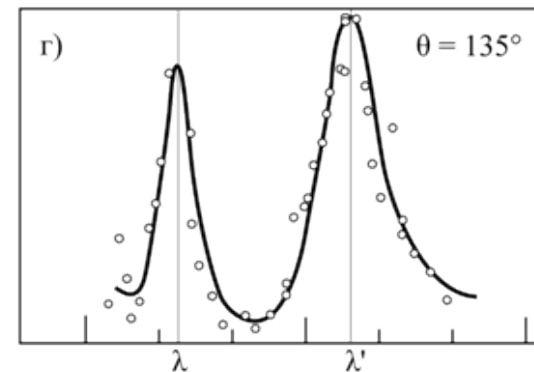
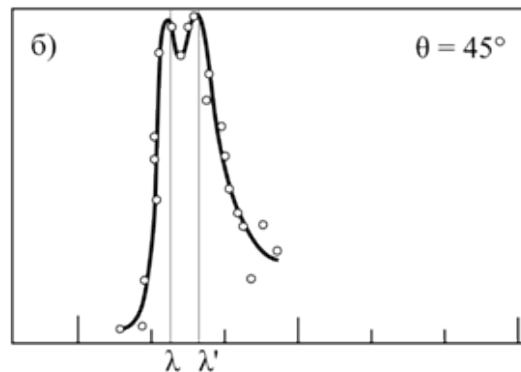
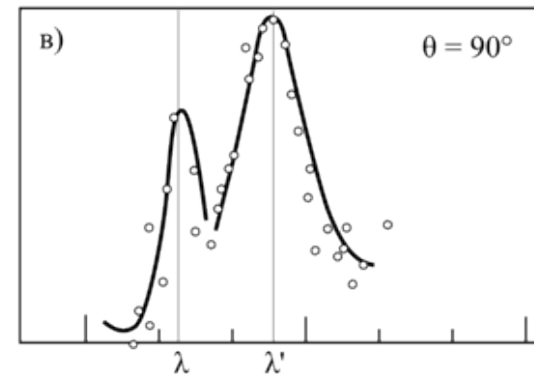
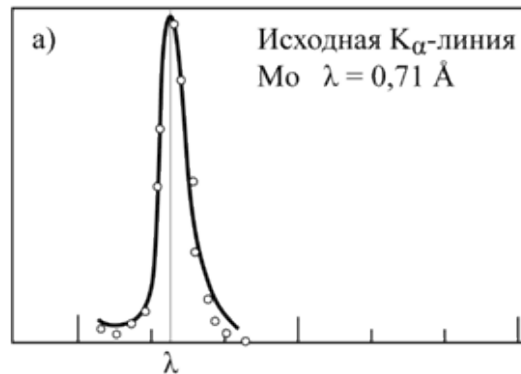
$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2,426 \text{ нм}$$

КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ,
 m_0 – масса покоя электрона.

Эффект Комптона

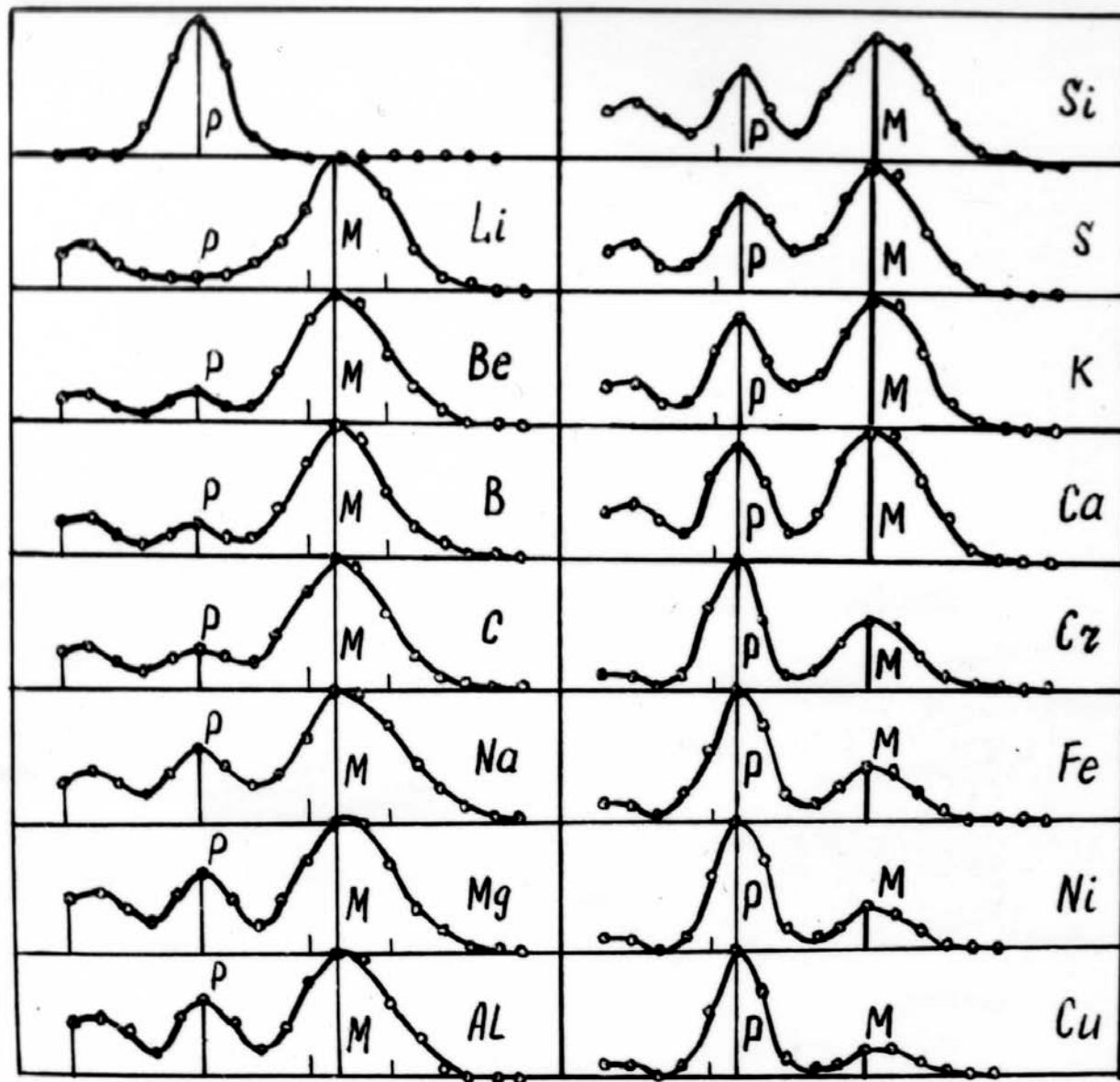


Результаты
исследования
рассеяния
монохроматических
рентгеновских лучей
на графите.



Эффект Комптона

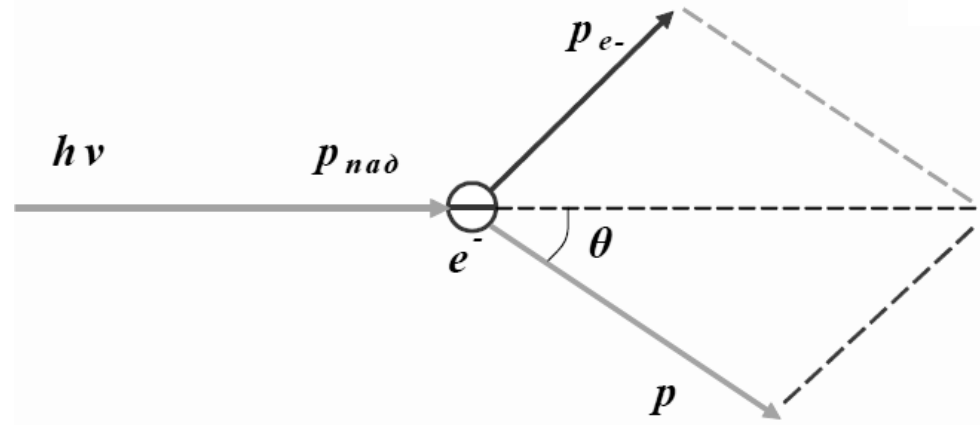
Зависимость соотношения интенсивности смещенной и несмещенной компонент от атомного номера рассеивающего вещества.



Эффект Комптона

В процессе упругого рассеяния фотона $h\nu$ со свободным электроном фотон передаёт электрону часть своей энергии и импульса. В соответствии с законами их сохранения фотон потеряет часть своей энергии, энергия фотона уменьшается, уменьшается частота ν , длина волны λ увеличивается.

$$\frac{\omega}{c} = k$$



$$\mathcal{E}_{\text{фотона}} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$$\hbar\omega + mc^2 = \hbar\omega' + c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$$

$$\hbar\vec{k} = \vec{p} + \hbar\vec{k}'$$

$$\sqrt{p^2 + m^2c^2} = \hbar(k - k') + mc$$

Эффект Комптона

$$\hbar\omega + mc^2 = \hbar\omega' + c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$$

$$\hbar\vec{k} = \vec{p} + \hbar\vec{k}'$$

$$\sqrt{p^2 + m^2c^2} = \hbar(k - k') + mc$$



$$p^2 = \hbar^2(k^2 + k'^2 - 2kk') + 2\hbar mc(k - k')$$

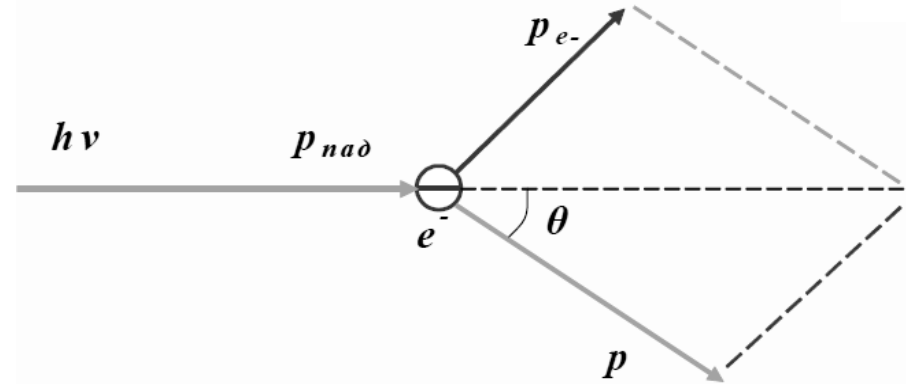
С другой стороны

$$p^2 = \hbar^2(\vec{k} - \vec{k}')^2 = \hbar^2(k^2 + k'^2 - 2kk' \cos \theta)$$



$$mc(k - k') = \hbar kk'(1 - \cos \theta) \times \frac{2\pi}{mckk'}$$

$$\frac{2\pi}{k'} - \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi\hbar}{mc} (1 - \cos \theta)$$



$$\frac{2\pi}{k} = \lambda$$

Комптовская
длина волны:

$$\lambda_C = \frac{2\pi\hbar}{mc}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos \theta)$$

