

КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОПТИКЕ

Фотоэффект и его виды

Фотоэффект и его виды

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

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

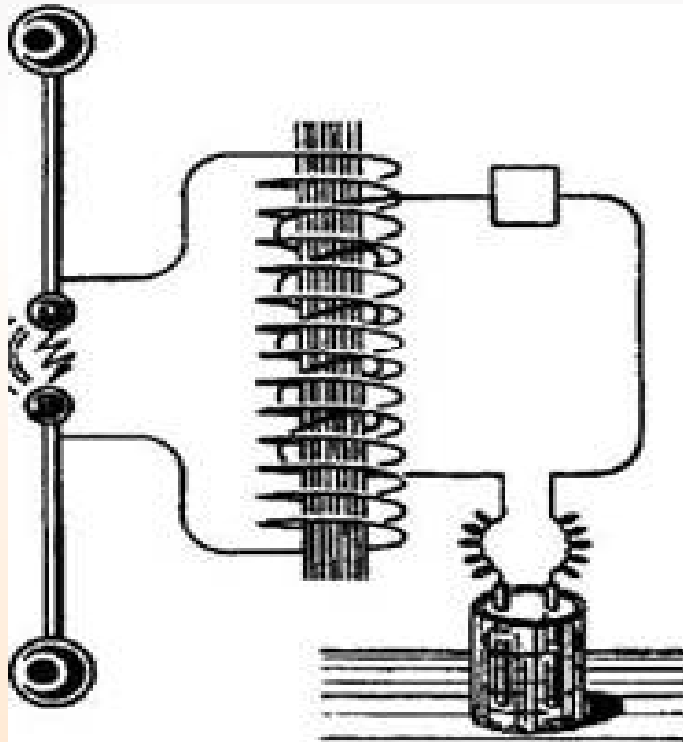
Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

Вентильный фотоэффект, – возникновение эдс (фото-эдс) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля).

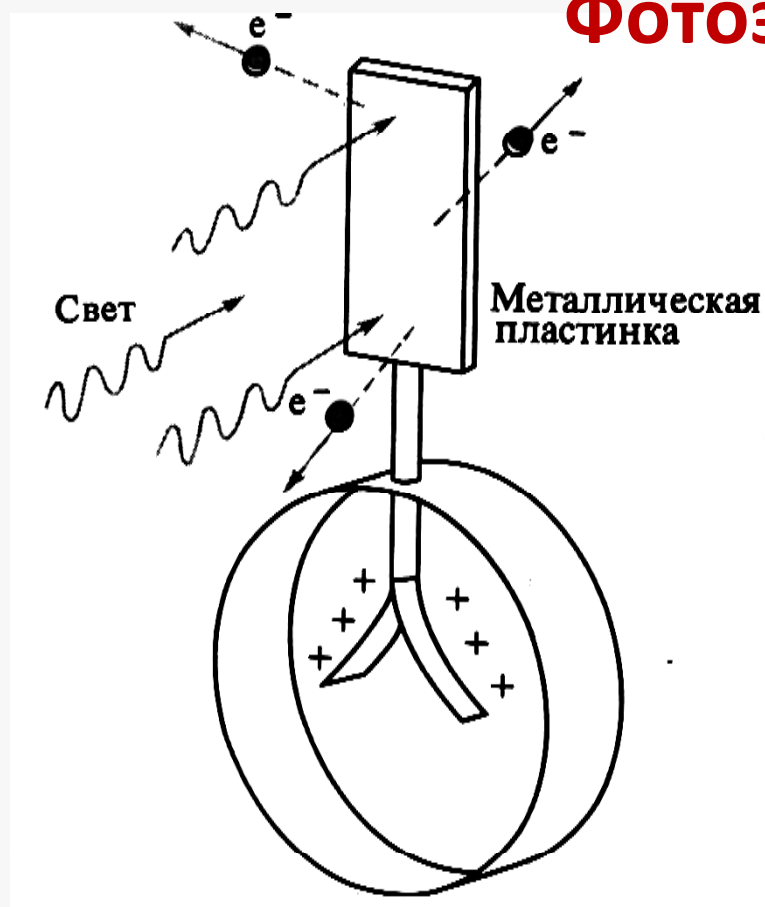
Многофотонный фотоэффект возможен, если интенсивность света очень большая (при использовании лазерных пучков).

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

<http://www.youtube.com/watch?v=6cgd14bFCQM>

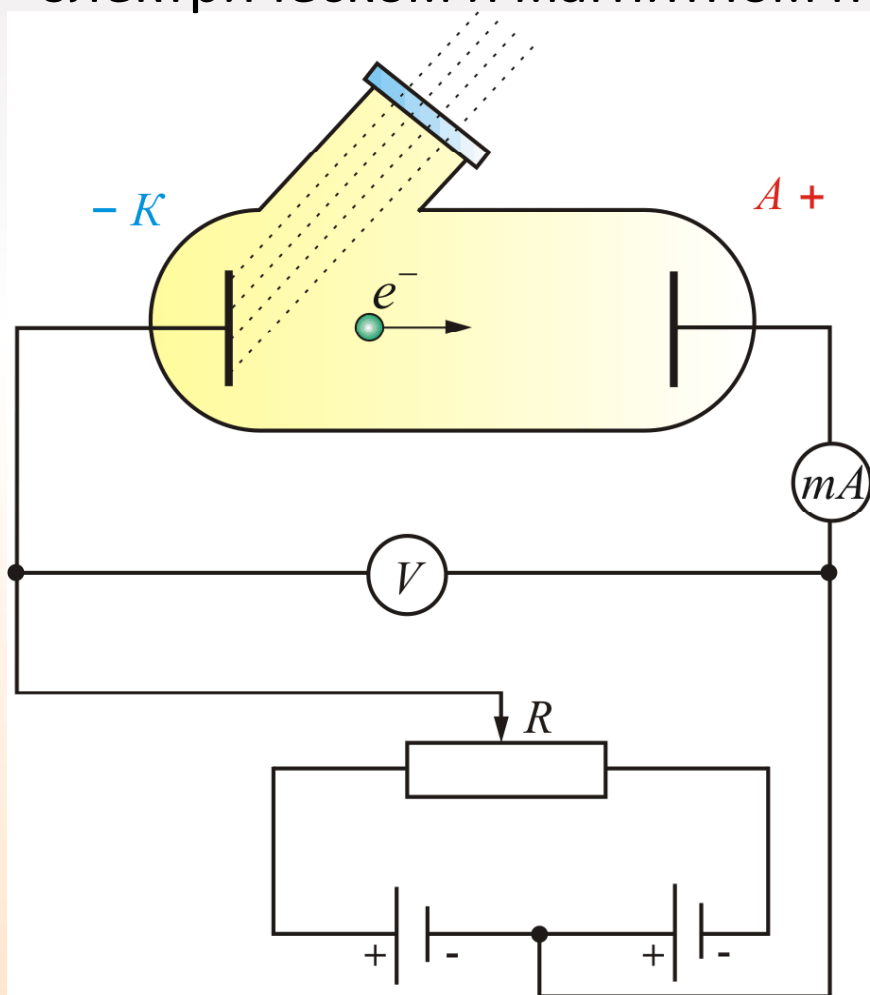
Фотоэффект

Закономерности, установленные Столетовым:

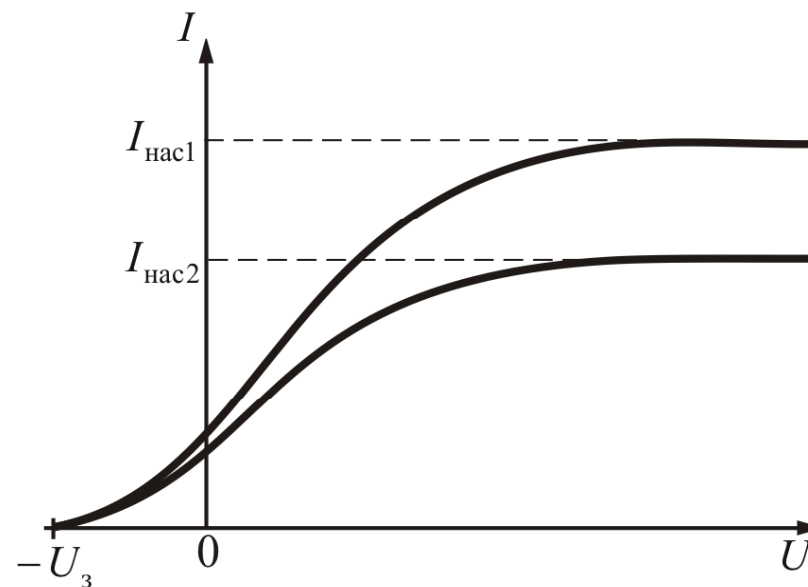
- 1. Наиболее эффективное действие оказывает ультрафиолетовое излучение.*
- 2. Под действием света вещество теряет только отрицательные заряды.*
- 3. Сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности*
- 4. Безинерционность процесса*

Фотоэффект

В 1899 Дж. Дж. Томпсон и Ф. Ленард установили, что при фотоэффекте **свет выбивает из вещества электроны** (был измерен заряд испускаемых частиц по их отклонению в электрическом и магнитном полях).

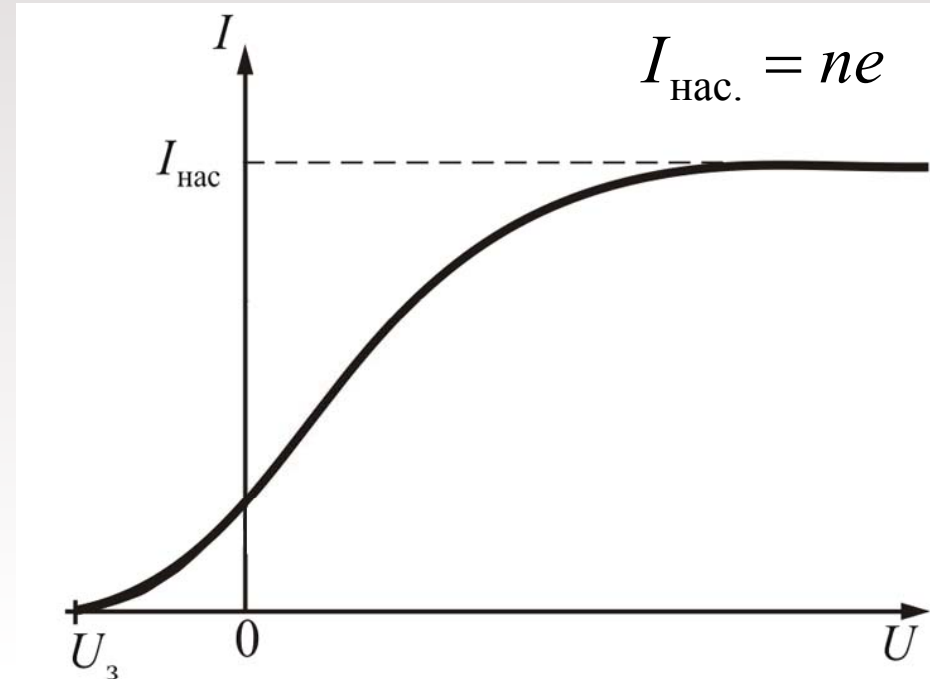


Вольтамперная характеристика (ВАХ)



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

$$I_{нас.} = ne,$$



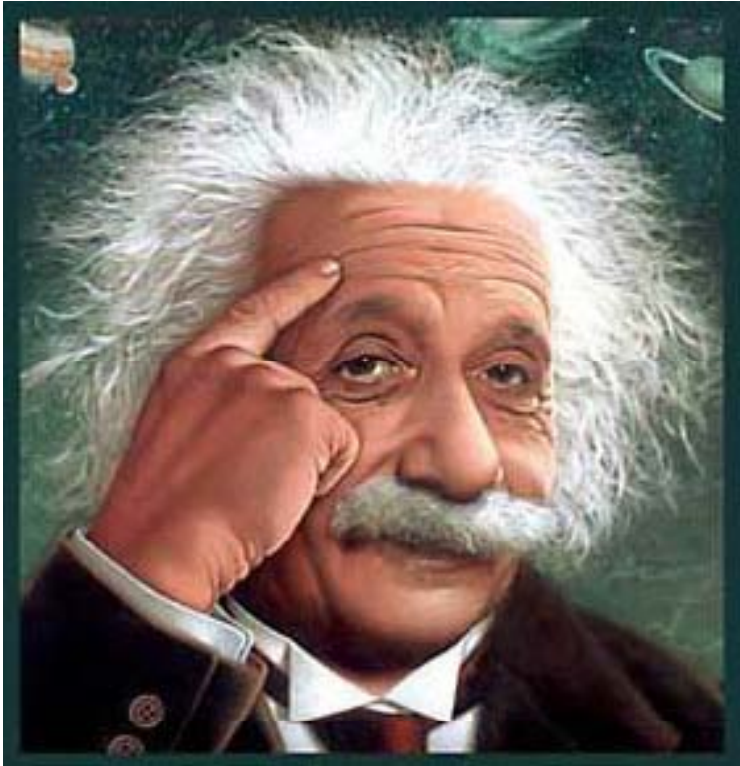
где n – число электронов испускаемых катодом в 1 с.

Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение U_3**

$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = eU_3$$

Законы фотоэффекта:

1. **Закон Столетова:** при фиксированной частоте падающего света **число фотоэлектронов**, вырываемых из катода в единицу времени, **пропорционально интенсивности света**.
2. **Закон Столетова:** **Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .**
3. **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**



Объяснение наблюдаемых
экспериментально закономерностей
было дано Эйнштейном:

Альберт Эйнштейн

(Albert Einstein)

14 марта 1879
Родился *Ульм (Ulm)*
Германия
18 апреля 1955
Умер *Принцетон (Princeton)*
США (New Jersey)

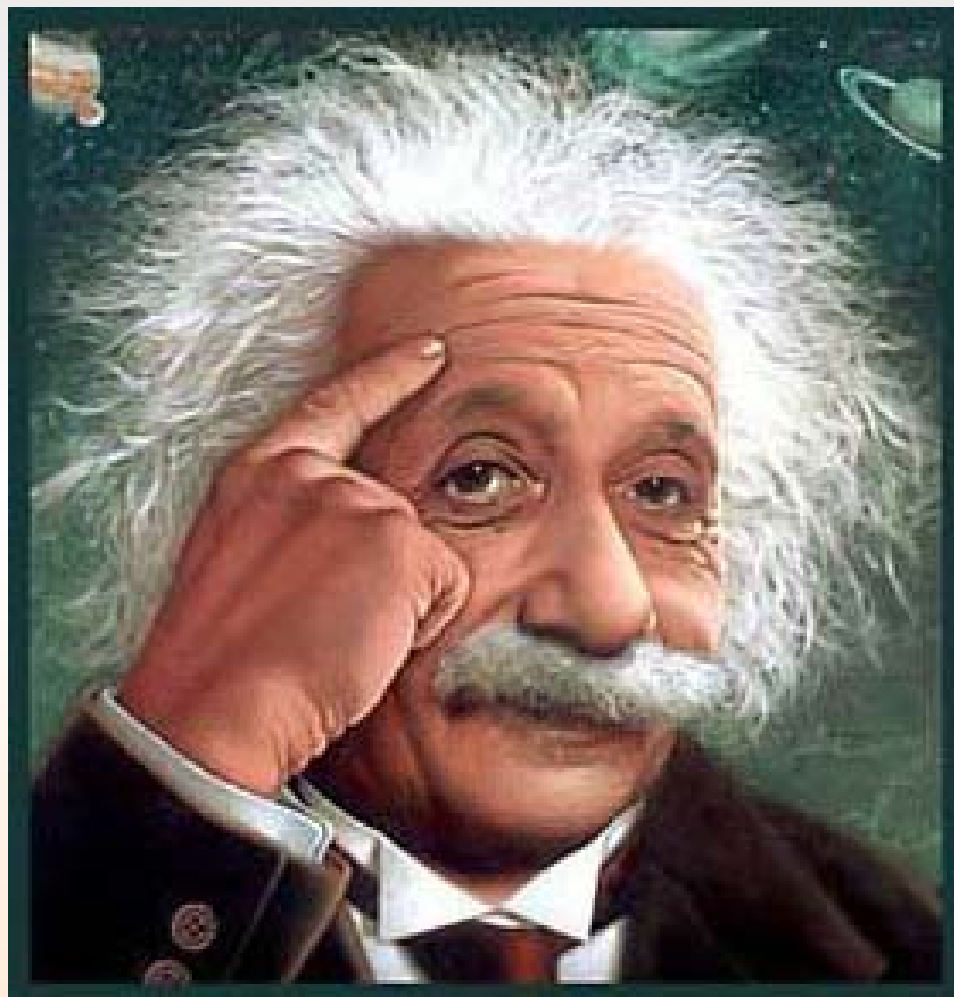
величайший ученый 20 века

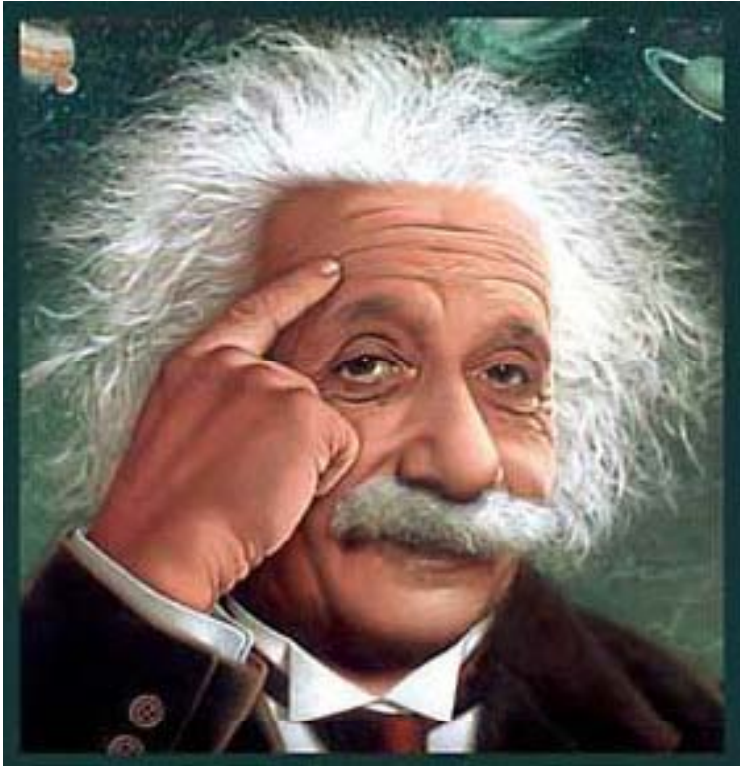
важнейшие работы

теория относительности
квантовая и статистическая механика
космология

Нобелевская премия по физике 1921:

**Дана как раз за работы в области
исследования фотоэффекта**





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.

Из теории Эйнштейна для фотоэффекта:

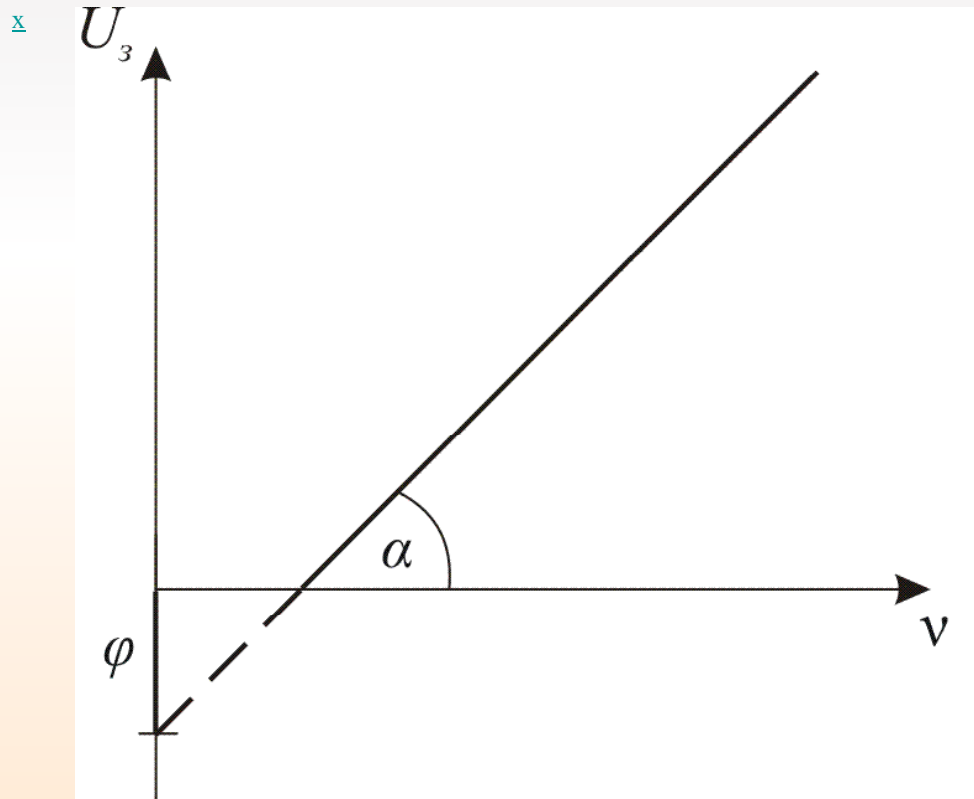
1. Каждый квант поглощается только одним электрном.
2. Увеличение интенсивности света означает увеличение числа налетающих фотонов. Как следствие, число вырванных фотоэлектронов пропорционально интенсивности света (**I закон фотоэффекта**).
3. При увеличении частоты падающего света максимальная кинетическая энергия электронов возрастает линейно по формуле Эйнштейна (**II закон фотоэффекта**).

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

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

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

$$eU_3 = h(\nu - \nu_0)$$

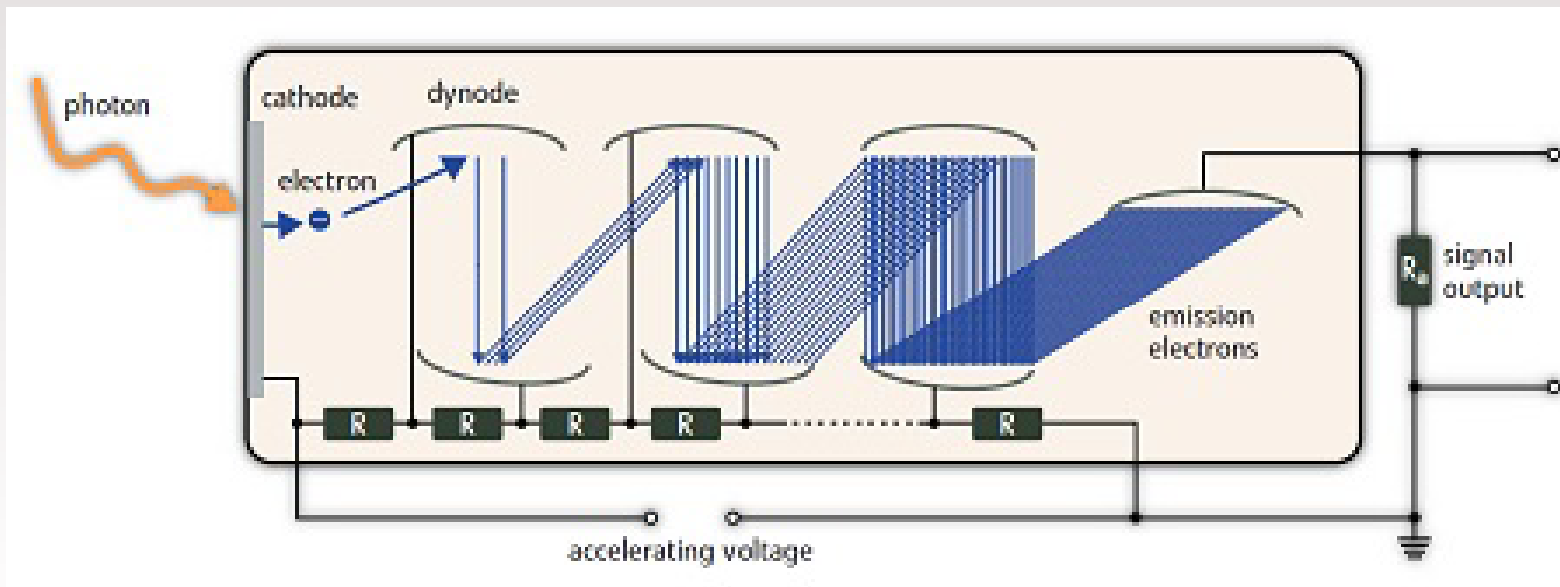


Уравнение Эйнштейна было подтверждено опытами Милликена, выполненными в 1916 г. (определил значение постоянной Планка)

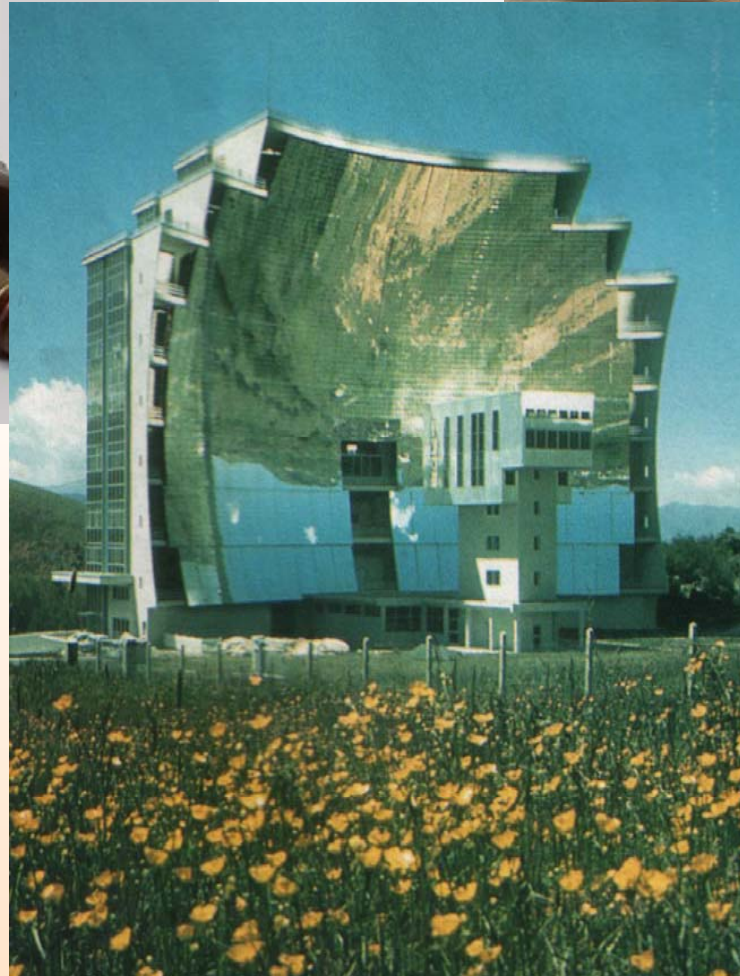
Многофотонный (нелинейный) фотоэффект

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:

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



Фотоэлектронные умножители



**Фотонная теория света.
Масса, энергия и импульс фотона**

Фотонная теория света.

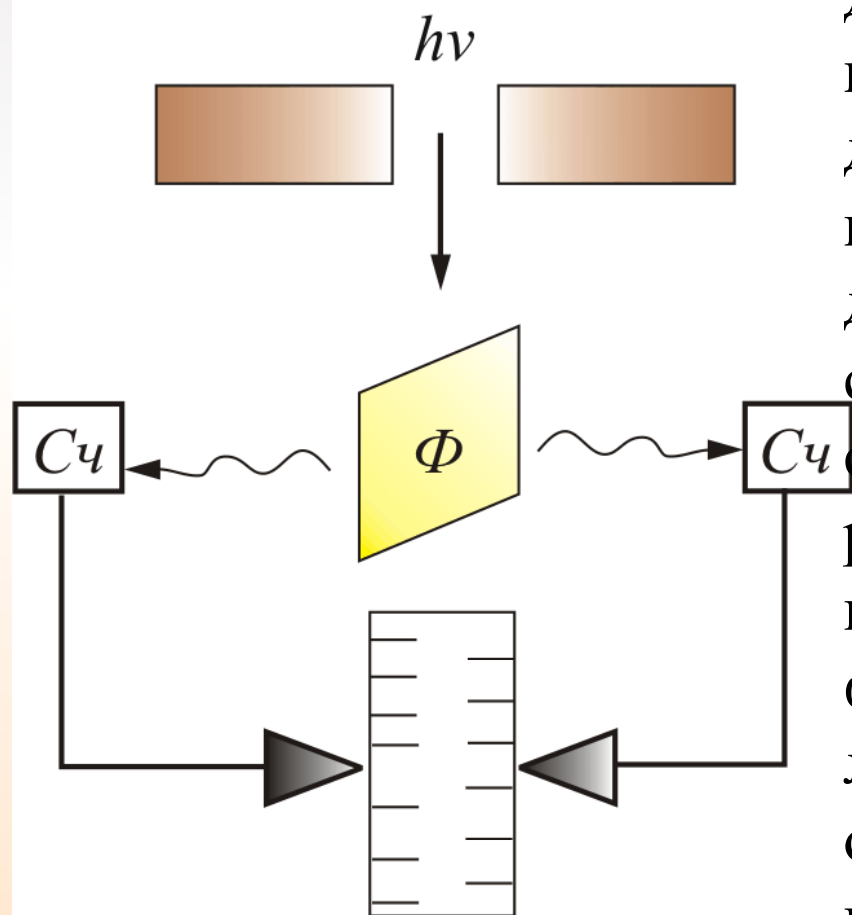
Масса, энергия и импульс фотона

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**.

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 .

Релятивистские выражения (1) для импульса:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(2) и для энергии:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

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

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

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

$$\frac{\nu}{2\pi} = \omega$$

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c}$$

$$k = \frac{\omega}{c} \quad \text{— волновое число}$$

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

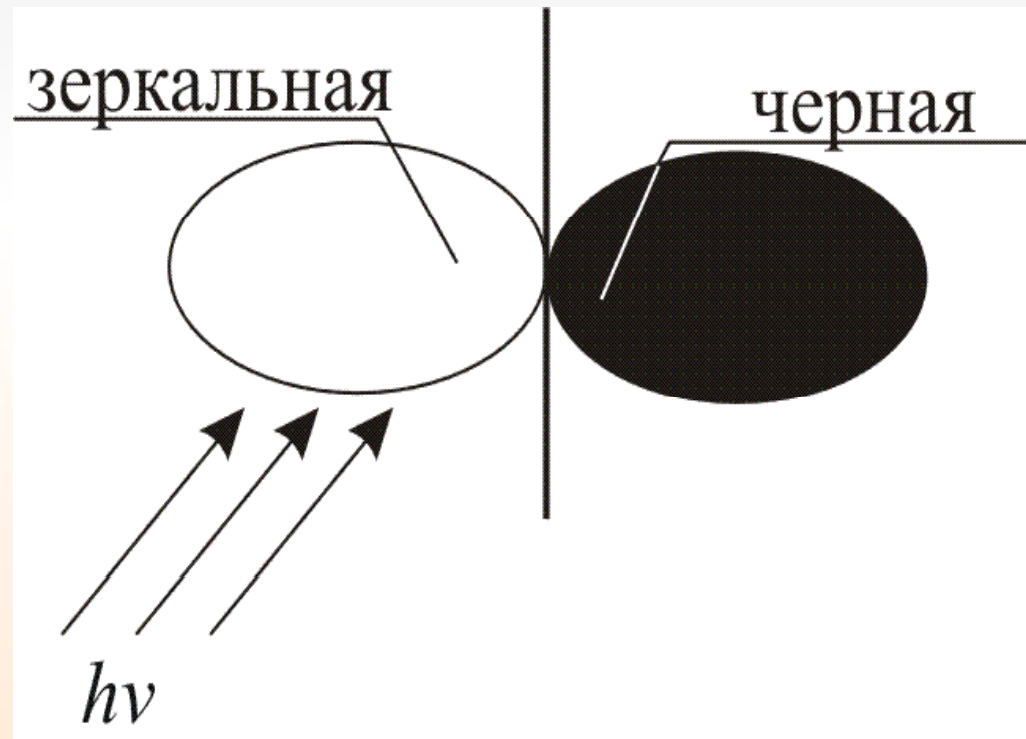
\vec{k} — волновой вектор фотона.

Давление света

Давление света

Исследовано *Лебедевым П.Н. в 1901 году.*

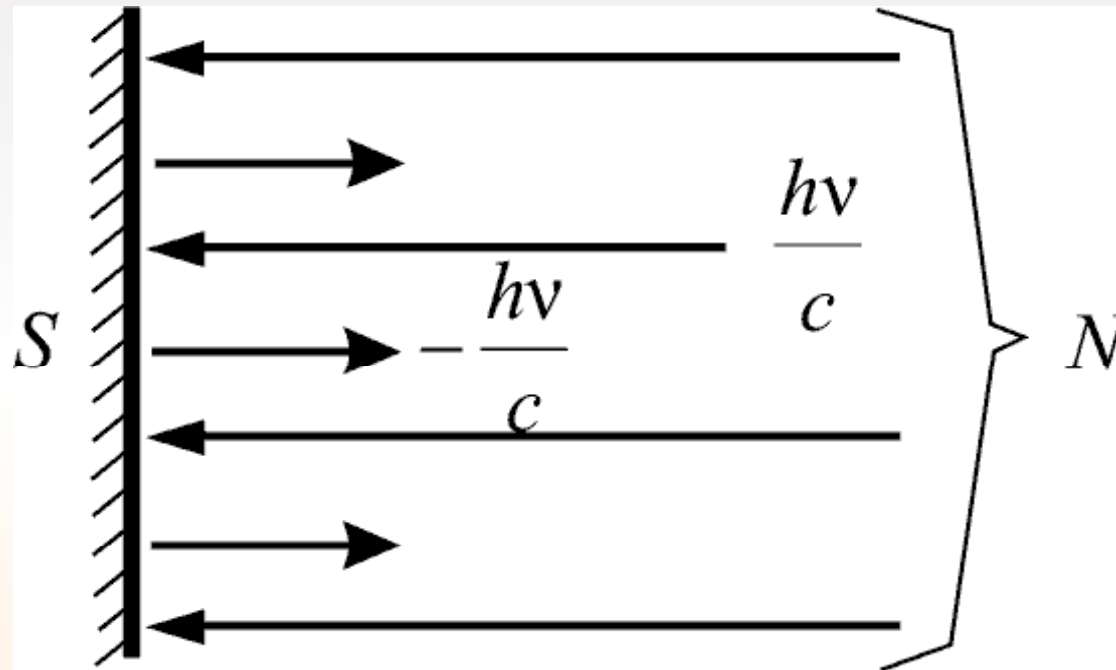
В своих опытах он установил, что *давление света зависит от интенсивности света и от отражающей способности тела.*



<http://www.youtube.com/watch?v=pP1bXQbRUx8>

Давление света

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

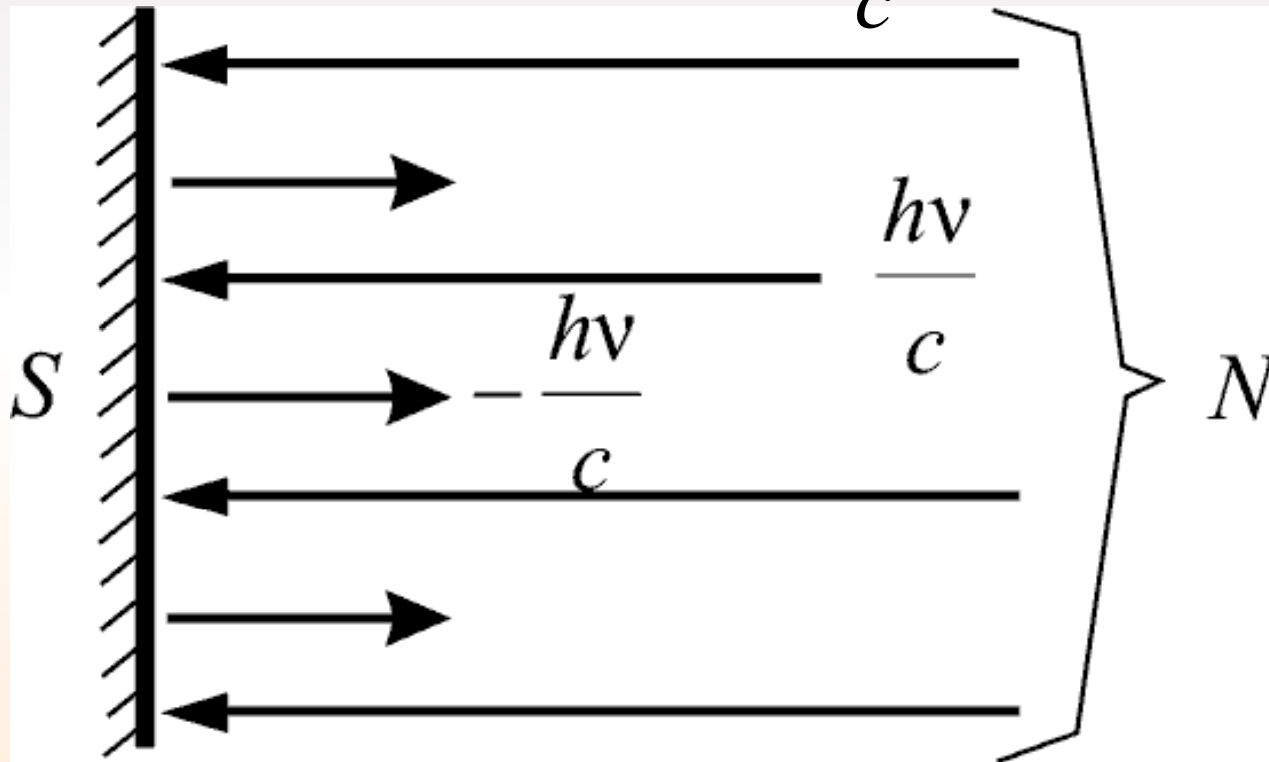


ρN - квантов отразится от поверхности;
 $(1 - \rho)N$ – поглотится,
 ρ –коэффициент отражения.

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

Давление света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности в 1 сек. N фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho) N = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N$$

$Nh\nu = E_e$ - энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, т. е.

энергетическая освещенность поверхности, а

$E_e / c = w$ - **объемная плотность энергии излучения.** Поэтому давление, производимое светом при нормаль- ном падении на поверхность равно

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

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.

http://www.youtube.com/watch?v=OGT_rcpbvDI

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:

