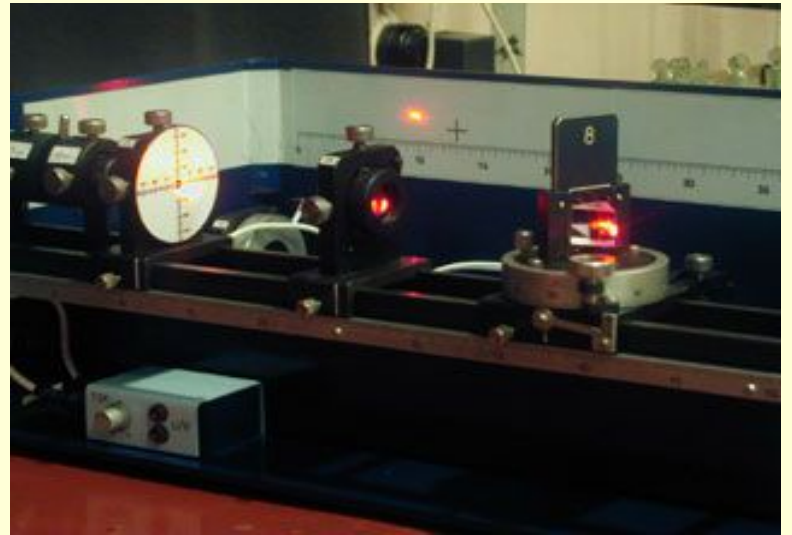


# Оптика и квантовая физика

для студентов  
2 курса ФТФ и ГГФ



Кафедра общей физики



# Квантово-оптические явления

## Часть 1

- Тепловое излучение
- Внешний фотоэффект

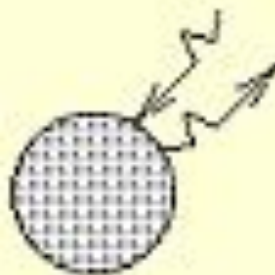


# Тепловое излучение



## Виды излучения:

1. Хемилюминесценция
2. Фотолюминесценция
3. Электролюминесценция
4. Тепловое (температурное) излучение

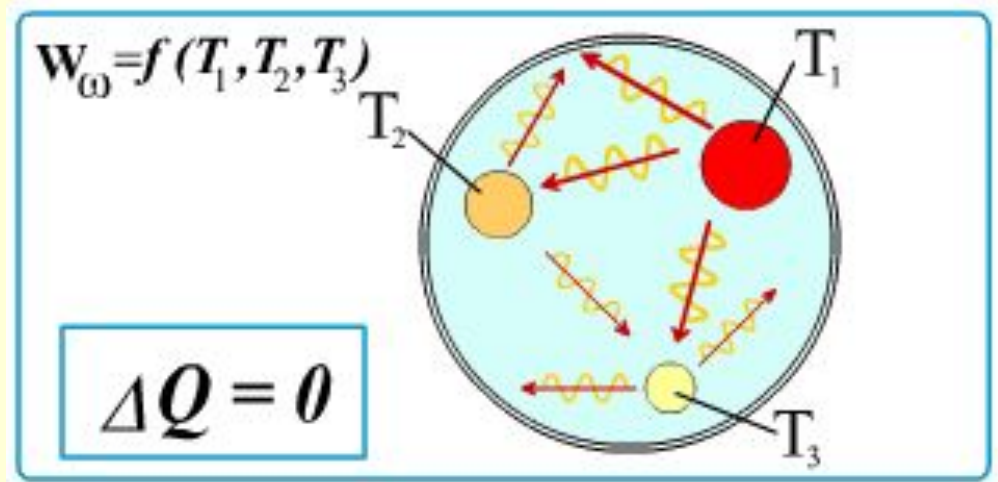


**Тепловое излучение** - электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств тела.



# Тепловое излучение

Особенность **теплового излучения** – излучающее тело может находиться в равновесии с окружающим его электромагнитным полем.  $\Delta U_{\text{излуч.}} + \Delta U_{\text{погл.}} = 0$



**Равновесное излучение** - тепловое излучение в состоянии термодинамического равновесия с веществом; в адиабатически замкнутой системе независимо от исходного состояния через некоторое время устанавливается равновесие, а температуры всех тел выравниваются.

# Характеристики теплового излучения

$$R = d\Phi/dS$$

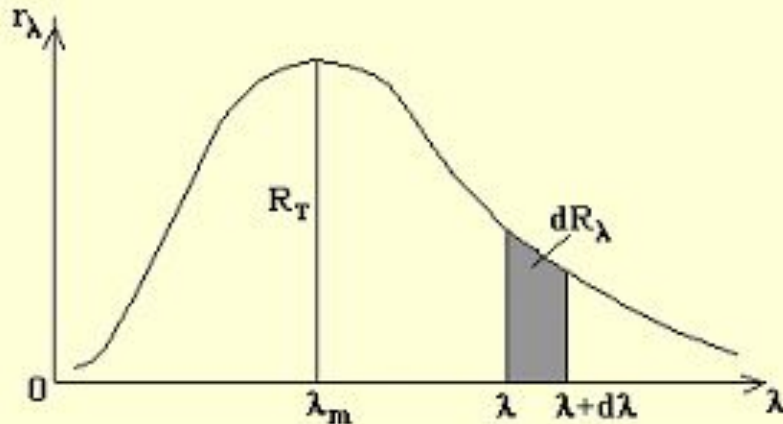
- энергетическая светимость или интегральная испускательная способность, где  $\Phi$  – поток энергии или мощность излучения

$$r_{\lambda,T} = \frac{\Phi}{dS \cdot d\lambda} = \frac{dR}{d\lambda}$$

- испускательная способность или спектральная светимость. Равна мощности, излучаемой с единицы поверхности тела и приходящейся на единицу интервала длин волн вблизи данной  $\lambda$

$$a_{\lambda,T} = d\Phi'_{\lambda} / d\Phi_{\lambda}$$

- поглощательная способность тела, где  $d\Phi'_{\lambda}$  – поглощаемый поток;  $d\Phi_{\lambda}$  – падающий на тело поток энергии.



$$R = \int_0^{\infty} dR_{\lambda} = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda$$

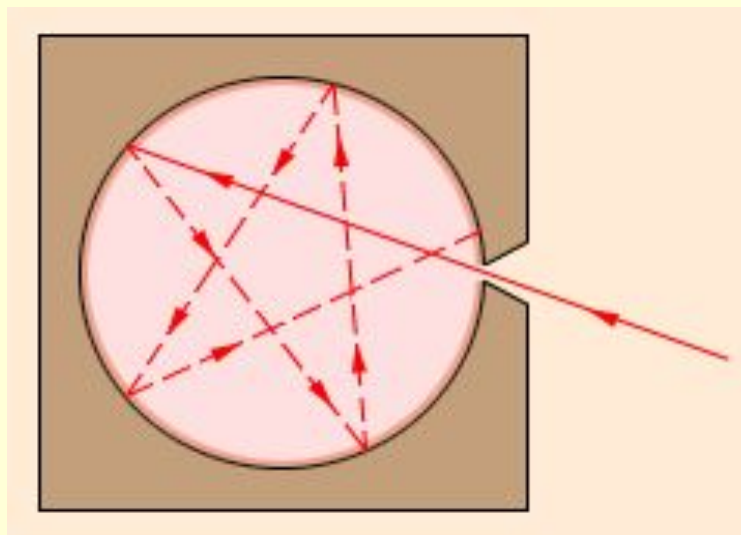
# Характеристики теплового излучения



Тела, которые поглощают все падающее на них излучение, называются **абсолютно черными**

*Модель абсолютно черного тела*

$$a_{\lambda, T}^* = 1$$



**Коэффициент черноты** – отношение энергетической светимости тела к энергетической светимости **АЧТ**. Если коэффициент черноты меньше единицы и не зависит от частоты излучения, то тело называют **серым**. Если коэффициент черноты различен в различных частях спектра, то тело называют **селективным** или **цветным**.



# Законы теплового излучения



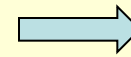
## Закон Кирхгофа

Отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от физической природы тела и является

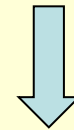
универсальной функцией  $\lambda$  и  $T$ : 
$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f(\lambda, T)$$

Для абсолютно черного тела

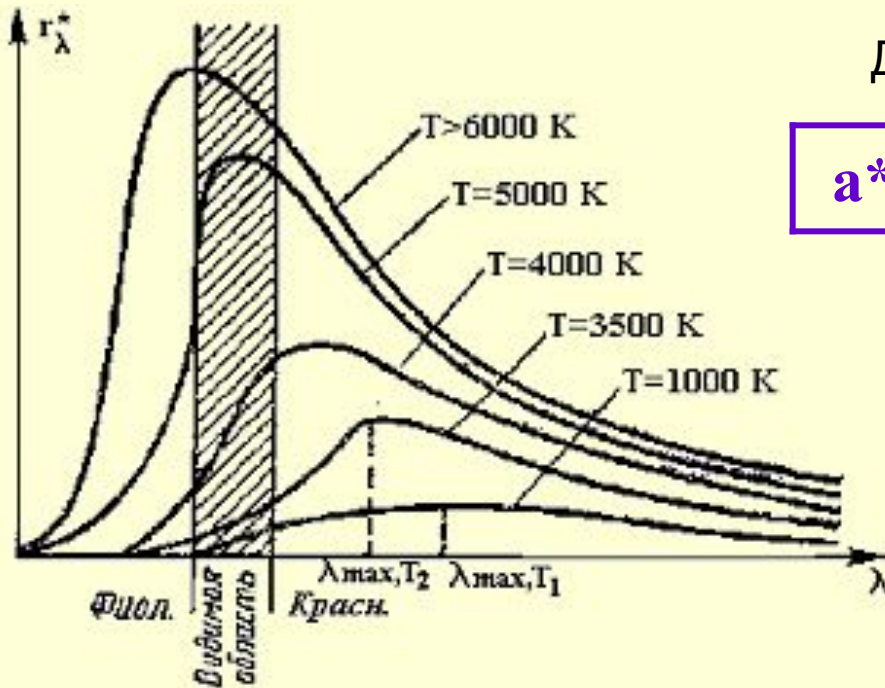
$$a_{\lambda,T}^* = 1$$



$$f(\lambda, T) = r_{\lambda,T}^*$$

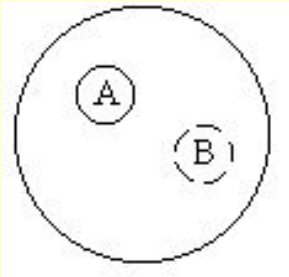


$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}^*$$

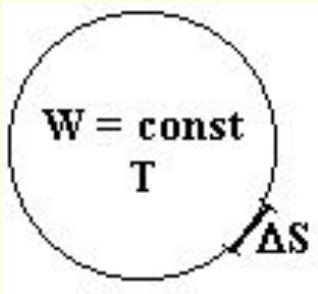


# Доказательство закона Кирхгофа

## $T/d$ равновесие с температурой $T$



Плотность энергии равновесного теплового излучения не зависит от физической природы тела и определяется только его  $T$ .



## $\Delta S$ - абсолютно черное тело

Энергия, которую участок  $\Delta S$  излучает за единицу времени и получает от остальной оболочки в спектральном интервале  $d\lambda$ :

Абсолютно черное тело  
– замкнутая оболочка с  
температурой  $T$

$$d\Phi_{\text{изл}} = d\Phi_{\text{погл}} = r_{\lambda, T}^* \cdot d\lambda \cdot \Delta S$$

## $\Delta S$ - не абсолютно черное тело

$$d\Phi_{\text{изл}} = r_{\lambda, T} \cdot d\lambda \cdot \Delta S$$

$$d\Phi_{\text{погл}} = a_{\lambda, T} \cdot r_{\lambda, T}^* \cdot d\lambda \cdot \Delta S$$



$$r_{\lambda, T} \cdot d\lambda \cdot \Delta S = a_{\lambda, T} \cdot r_{\lambda, T}^* \cdot d\lambda \cdot \Delta S$$



$$r_{\lambda, T} / a_{\lambda, T} = r_{\lambda, T}^*$$



# Следствия из закона Кирхгофа



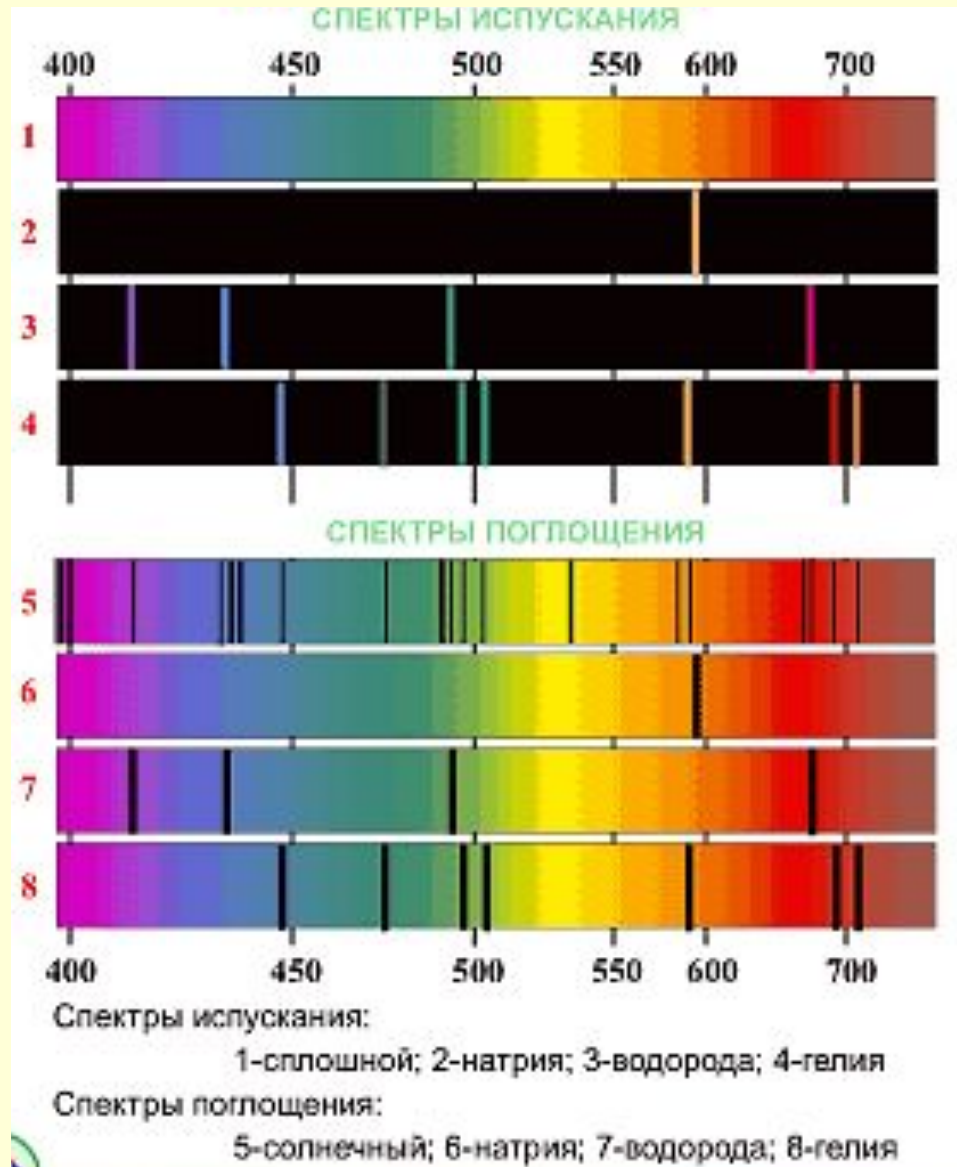
1.  $r_{\lambda,T}$  и  $a_{\lambda,T}$  не независимы: чем больше  $a_{\lambda,T}$ , тем больше  $r_{\lambda,T}$ ;

2. 
$$r_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot r_{\lambda,T}^* \left. \vphantom{r_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot r_{\lambda,T}^*} \right\} \longrightarrow r_{\lambda,T} < r_{\lambda,T}^*$$
  
для всех нечерных тел  $a_{\lambda,T} < 1$

то есть абсолютно черное тело является наиболее интенсивным тепловым излучателем среди всех тел, имеющих одинаковую с ним температуру.

3. Если  $a_{\lambda,T} = 0$ , то и  $r_{\lambda,T} = 0$ , т.е. если тело не поглощает электромагнитные волны какой-либо  $\lambda$ , то оно их и не излучает.

# Законы теплового излучения



# Законы теплового излучения



## Закон Стефана – Больцмана

$$R^* = \delta \cdot T^4,$$

$\delta = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – постоянная Стефана - Больцмана.

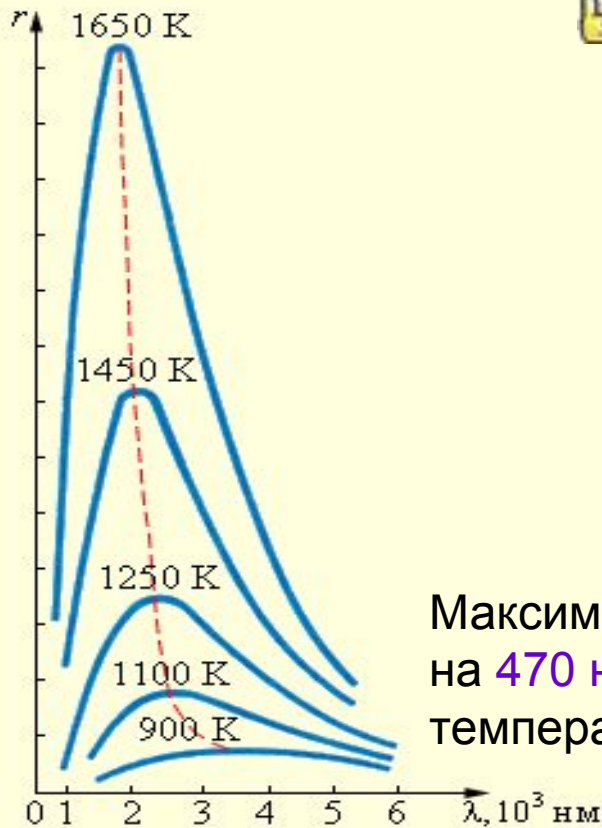


## Закон смещения Вина (1893 г.)

$$\lambda_m \cdot T = b$$

$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина,

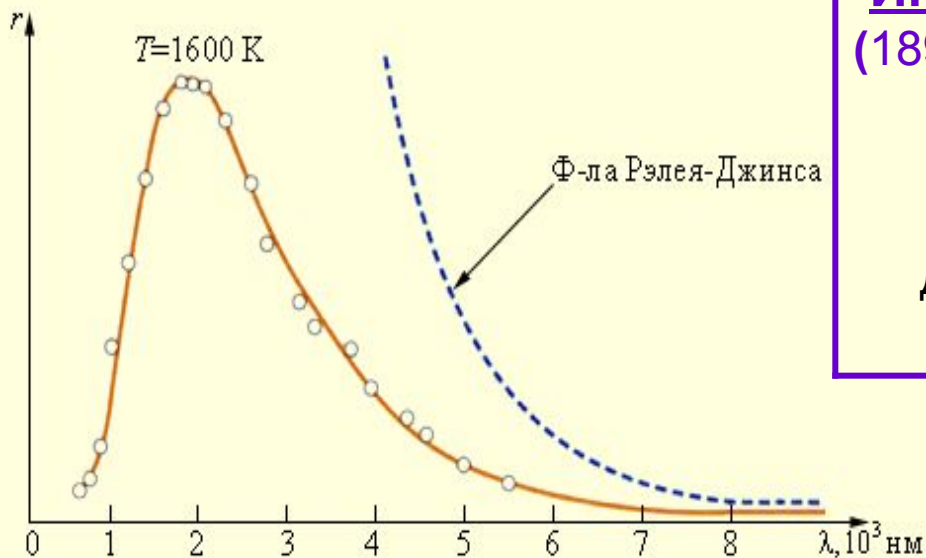
$\lambda_{\text{max}}$  – длина волны, соответствующая  
максимальному значению  $r^*_{\lambda, T}$



Максимум энергии излучения Солнца приходится примерно на **470 нм** (зеленая область спектра), что соответствует температуре наружных слоев Солнца около **6200 К**.

Модель 5.5. Излучение абсолютно черного тела

# Законы теплового излучения



**Интерполяционная формула Вина**  
(1896 г.)

$$r_{\lambda, T}^* = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

согласуется с экспериментальными данными только в области малых длин волн (слева от максимума).

**Формула Рэля – Джинса:**

$$r_{\lambda, T}^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot C \cdot k \cdot T}{\lambda^4}$$

Была получена теоретически, опираясь на законы классической физики:

1. спектр энергии атомных осцилляторов сплошной;
2. при термодинамическом равновесии на каждую степень свободы приходится энергия  $\varepsilon = kT/2$ .

При  $\lambda \rightarrow 0$   $r_{\lambda, T}^* \rightarrow \infty$  – «ультрафиолетовая катастрофа».



# Законы теплового излучения



## Формула Планка (1900 г.)

Формула выведена в предположении: поглощение и испускание излучения происходят конечными порциями - квантами, энергия атомных осцилляторов принимает дискретный ряд значений:  $\varepsilon = n \cdot h \cdot \nu$  ( $n = 1, 2, \dots$ ).

$h$  – постоянная Планка.

$$r_{\lambda, T}^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

или

$$r_{\lambda, T}^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot \nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



Из формулы Планка следуют все частные законы теплового излучения:

а) при  $h\nu \ll kT$  – формула Рэля – Джинса;

б) при  $h\nu \gg kT$  – формула Вина;

в)  $R^* = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T}^* d\lambda$  Подставив формулу Планка, получим закон Стефана –

Больцмана, причем  $\delta = \frac{2 \cdot \pi^5 k^4}{15 \cdot c^2 h^3}$ .

Определив  $\delta$  экспериментально, нашли  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.





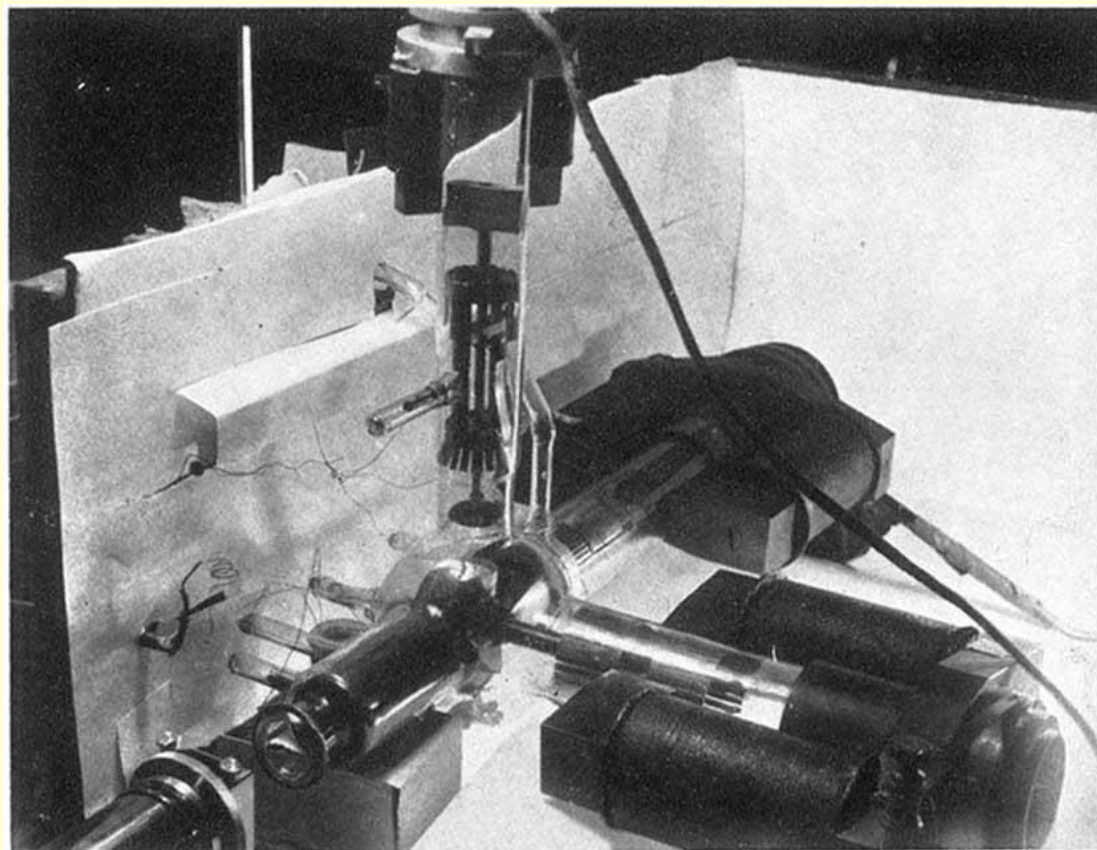
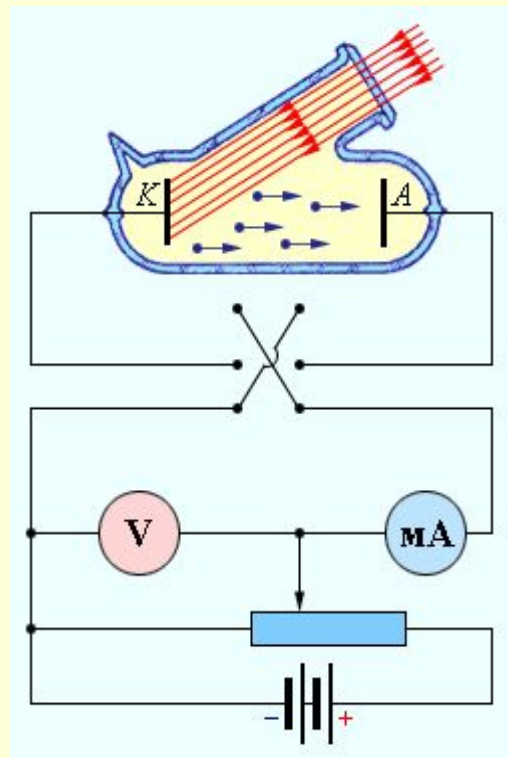
Г. Герц



## Внешний фотоэффект

Вырывание электронов из вещества под действием падающего света называется **внешним фотоэффектом**

### Экспериментальное изучение фотоэффекта



Фотография установки Р. Милликена (1916г.)

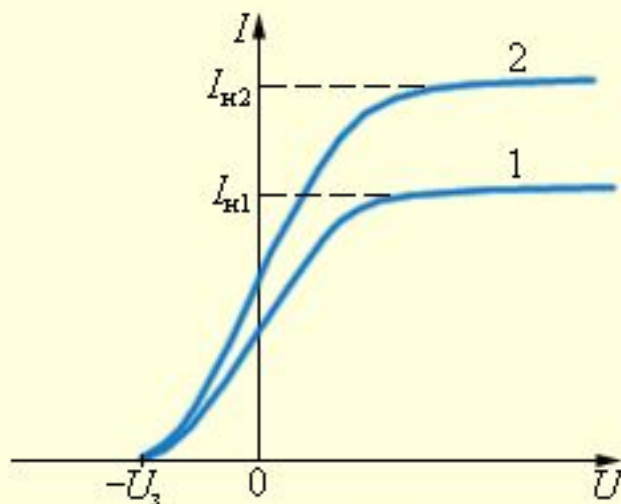






А.Г. Столетов

## Законы внешнего фотоэффекта

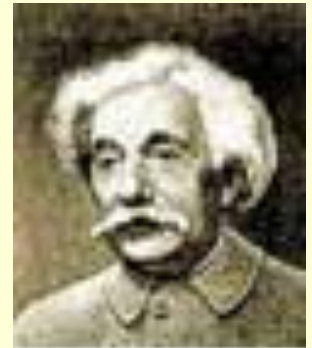


Вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента.  
Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.

1. Фототок насыщения пропорционален световому потоку, падающему на металл  $I_{н} \sim \Phi$ , и не зависит от его спектрального состава
2. Кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте падающего света и не зависит от его интенсивности.
3. Фотоэффект не наблюдается, если частота падающего света  $\nu < \nu_0$ . Характерная для каждого вещества частота  $\nu_0$  называется **красной границей фотоэффекта**.
4. Фотоэффект безинерционен. С начала облучения металла светом до начала вылета фотоэлектронов проходит время  $t < 10^{-9}$  с.

# Квантовая теория фотоэффекта

Эйнштейн объяснил экспериментальные законы фотоэффекта на основе квантовых представлений о природе света.



А. Эйнштейн

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + m\nu^2/2$$

**Первый закон фотоэффекта**

**Второй закон фотоэффекта**

$$\left. \begin{array}{l} \Phi \sim h\nu \cdot n_{\phi} \\ n_{\text{э}} \sim n_{\phi} \\ I \sim n_{\text{э}} \end{array} \right\} \Rightarrow I_{\text{н}} \sim \Phi$$

$$\left. \begin{array}{l} m\nu^2/2 = h\nu - A_{\text{ВЫХ}} \\ A_{\text{ВЫХ}} = \text{const} \end{array} \right\} \Rightarrow m\nu^2/2 \sim h\nu$$

**Третий закон фотоэффекта**

$$\left. \begin{array}{l} m\nu^2/2 = 0 \\ h\nu_0 = A_{\text{ВЫХ}} \end{array} \right\} \Rightarrow \nu_0 = A_{\text{ВЫХ}} / h \quad \text{— красная граница фотоэффекта}$$

Электрон приобретает кинетическую энергию *не постепенно* (ускоряясь электрическим полем волны), а *сразу* – в результате единичного акта взаимодействия  $\Rightarrow$  **безинерционность** фотоэффекта.



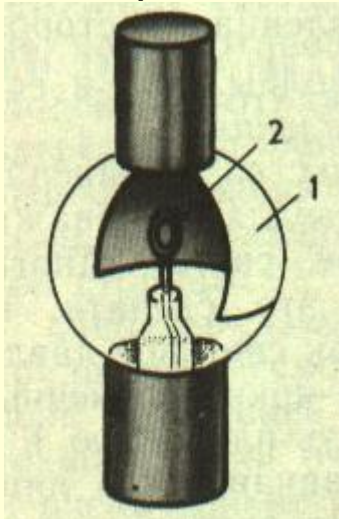
# Применение фотоэффекта

фотоэлектронные приборы

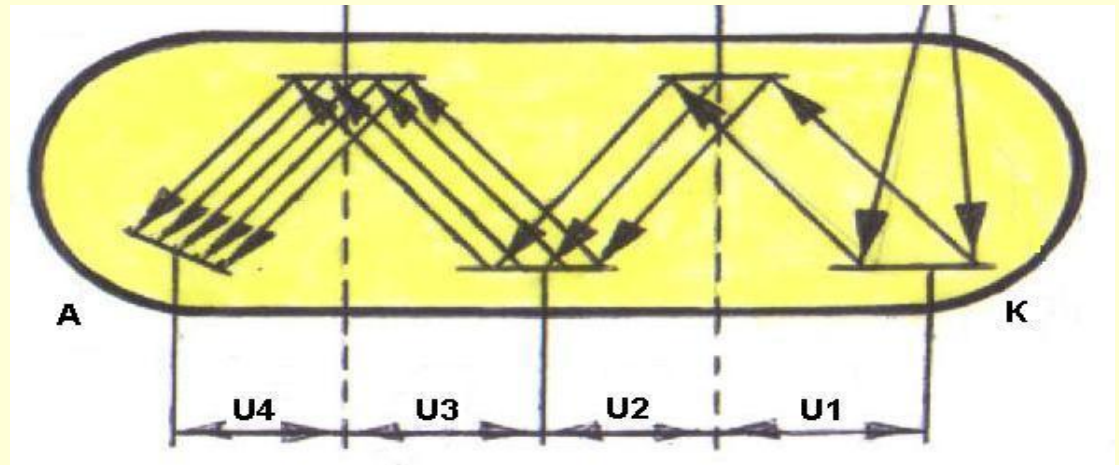
фотоэлементы

фотоумножители

Преобразование  
светового сигнала  
в электрический



Измерение очень малых  
световых потоков



В астрономии,  
спектроскопии и т.д.

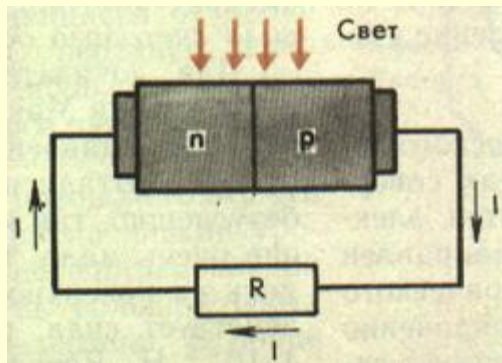
В метро, в фотометрии для измерения силы света, яркости, освещенности, в кино для воспроизведения звука, в фототелеграфах и фототелефонах, в управлении производственными процессами, на заводских прессах и т. д.

# Внутренний и вентильный фотоэффект

**Внутренний фотоэффект** — увеличение электропроводности полупроводников или диэлектриков под действием света (фотопроводимость) за счет образования пары неравновесных носителей тока (электрона и дырки) при поглощении фотона с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны.

**Вентильный фотоэффект** — возбуждение светом электродвижущей силы на границе между металлом и полупроводником или между разнородными полупроводниками (на p-n-переходе).

## Применение



В фотоэкспонетрах, при автоматическом управлении электрическими цепями (например, в турникетах метро), в цепях переменного тока, в качестве невозобновляемых источников тока в часах, микрокалькуляторах, солнечных батареях, фотоконденсаторах и других приборах.

## Внутренний и вентиляционный фотоэффект



Солнечные батареи на Международной космической станции



# Квантово-оптические явления

## Часть 2

- Развитие гипотезы световых квантов
- Эффект Комптона
- Давление света
- Фотолюминесценция

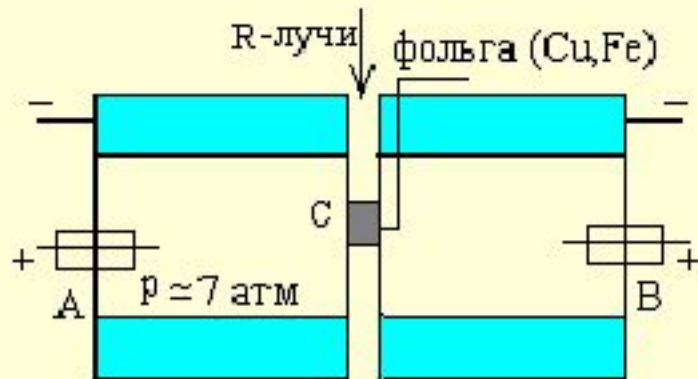
# Развитие гипотезы световых квантов

1905 г. Эйнштейн: Свет не только испускается, но также распространяется и поглощается квантами  $\varepsilon = h\nu$ .

## Опытные обоснования гипотезы световых квантов

### 1. *Опыты Боте (1926 г.)*

*изучение квантовых флуктуаций интенсивности рентгеновского излучения*



### *Установка Боте (1926 г.)*

*А и В* - индикаторы: счетчики Гейгера – Мюллера в свинцовом футляре;

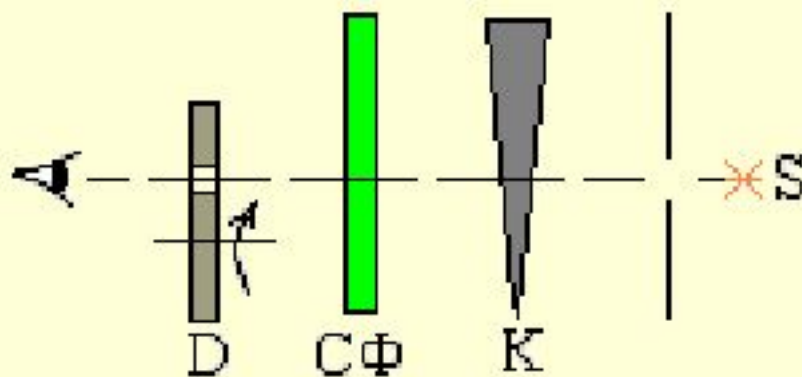
*С* – фольга Cu и Fe, которая при облучении R-лучами дает флуоресцентное излучение, т.е. является источником **слабого** рентгеновского излучения.

Результаты: счетчики А и В срабатывают не одновременно, что говорит о квантовом характере излучения.

# Опытные обоснования гипотезы световых квантов

## 2. *Опыты Вавилова С. И. (с видимым светом)*

*Порог чувствительности человеческого глаза  
~ 200 фотонов, попадающих в глаз за 1 секунду*



*Схема опыта Вавилова С. И.:*

**D** – диск вращающийся со счетчиком поворотов;

**СФ** – светофильтр ( $\lambda \sim 0,5$  мкм);

**К** – клин из дымчатого стекла.

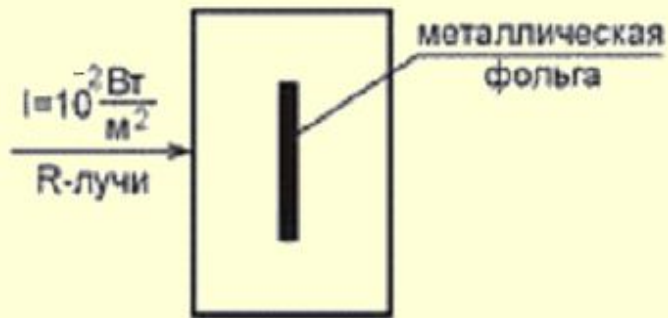
Длительность вспышки –  $\tau \approx 0,1$  с.

Оказалось, что вспышки видны *не все!*



# Опытные обоснования гипотезы световых квантов

## 3. *Опыты по наблюдению фотоэффекта в камере Вильсона*



**Сразу же** после включения рентгеновской трубки в камере обнаруживаются электроны с энергией  $\sim 10^4$  эВ.

Время накопления такой энергии атомами, рассчитанное из волновых представлений  $\sim 18,5$  суток!

Т.о., электрон должен поглощать всю энергию сразу.  
Классические представления о постепенной передаче энергии не верны.

# Свойства фотонов

1. Энергия фотона  $\varepsilon = h\nu$ .

2. Фотон обладает массой:  $\varepsilon = mc^2$ ,  $mc^2 = h\nu \rightarrow m_\phi = h\nu/c^2$

3. 
$$m_\phi = m_0 / \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

Для фотонов в вакууме  $\beta = V^2/c^2 = 1 \rightarrow m_0 = 0$

*Масса покоя фотона равна нулю!*

4. Импульс фотона  $\mathbf{p}_\phi = m_\phi \mathbf{c} = \frac{h\nu}{c^2} \cdot \mathbf{c} = \frac{h\nu}{c}$





# Эффект Комптона

Эффект заключается в изменении длины волны  $\lambda$  рентгеновского излучения при его рассеянии.

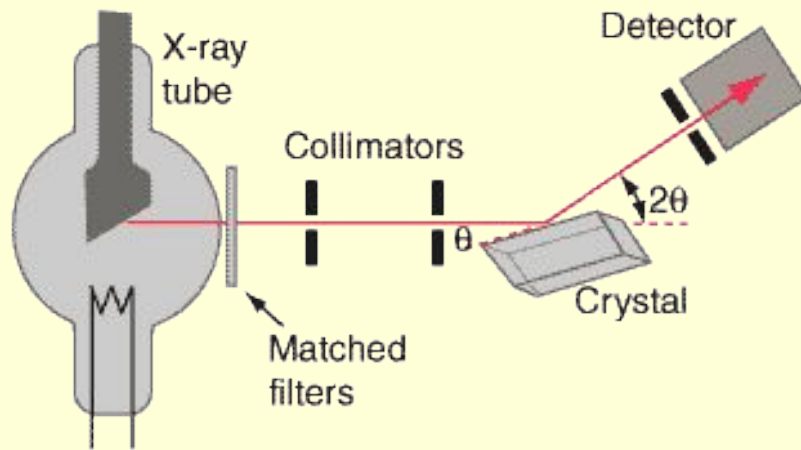


Рис. 1 Рентгеновский спектрометр У.Г.Брэгга

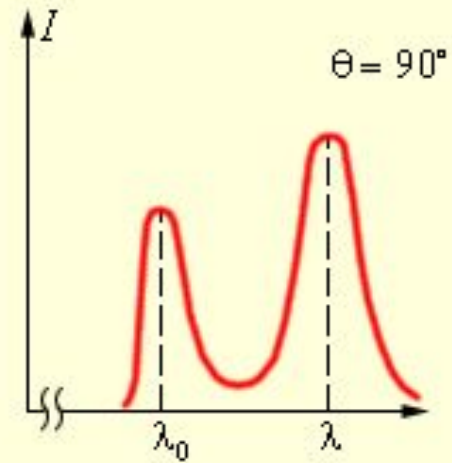
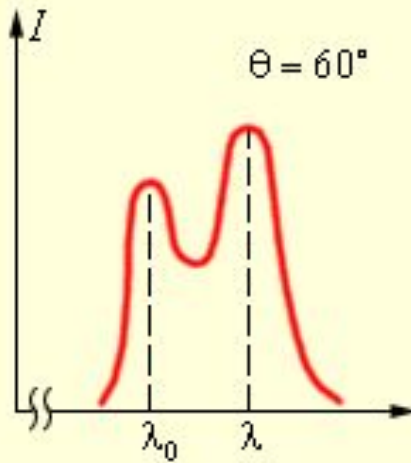
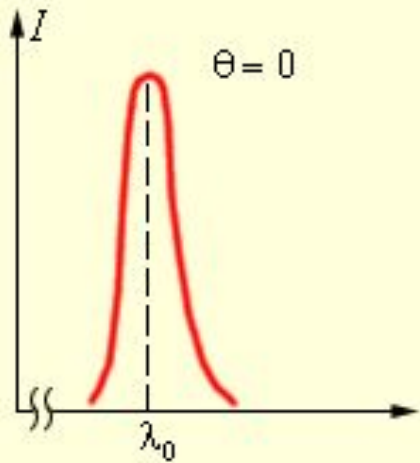
## Схема опыта



## Результаты опыта:

1. В рассеянном излучении присутствовали излучения с длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda' > \lambda$ ;
2.  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2k \cdot \sin^2(\theta/2)$  (Å);  $k = 0,0241$  Å ;
3.  $\Delta\lambda$  не зависит от  $\lambda$  и природы рассеивателя.

# Эффект Комптона



Спектры рассеянного излучения

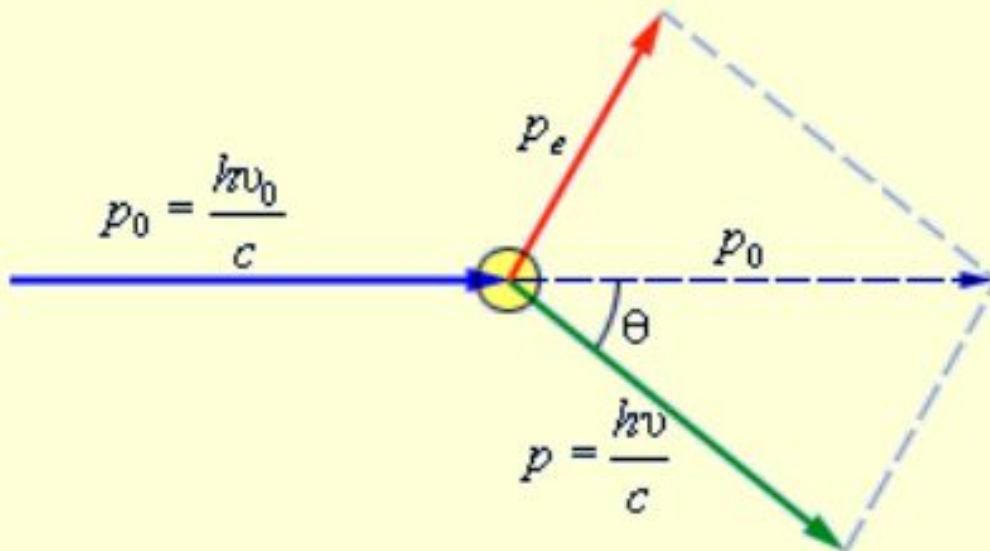


Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне.

# Теория эффекта Комптона

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2$$

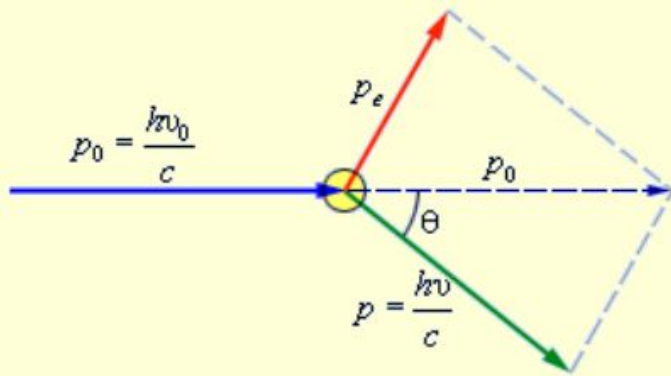
– по закону сохранения энергии, где  $m_0$  и  $m$  – масса электрона до и после столкновения

$$\mathbf{P}_\phi = \mathbf{P}_\phi' + \mathbf{P}_e$$

$$m^2v^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu \cdot \nu' \cdot \cos\theta$$

– по закону сохранения импульса

$$2m_0c^2h(\nu - \nu') = 2h^2\nu\nu'(1 - \cos\theta); \quad \longrightarrow \quad \lambda' - \lambda = \frac{2 \cdot h}{m_0 \cdot c} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}$$



$$\frac{h}{m_0c} = \lambda_K$$

– «комптоновская» длина волны,  
 $\lambda_K = 0,024 \text{ \AA}$

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = 2 \cdot \lambda_K \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} = 0.048 \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

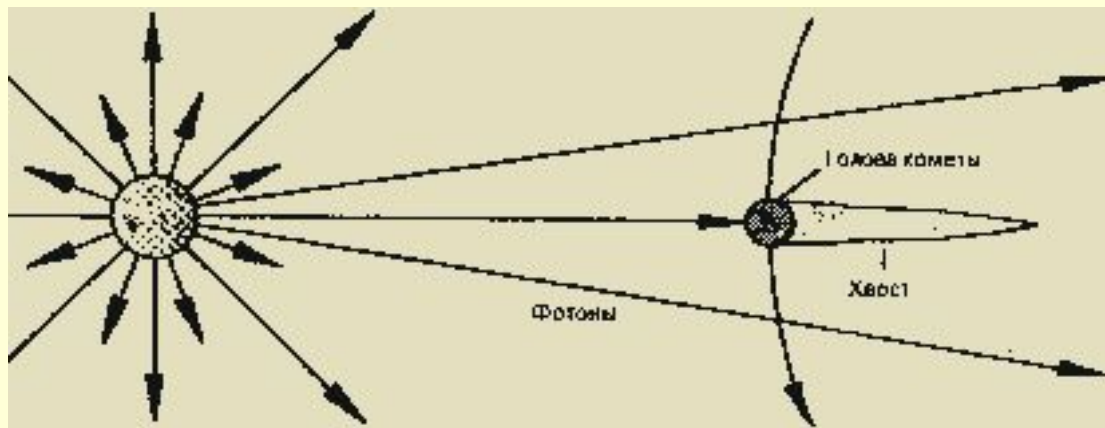
**Формула Комптона**



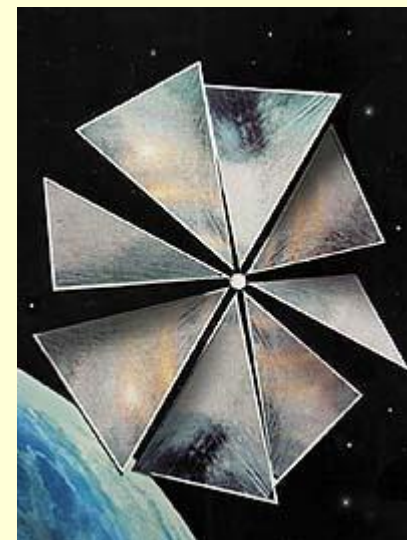
Наличие рассеянного излучения с длиной волны  $\lambda$  можно объяснить тем, что взаимодействуя с внутренними электронами (сильно связанными с атомом), фотон взаимодействует как бы с атомом в целом. Так как масса атома много больше массы фотона, то фотон отскакивает от него с той же энергией, а значит, без изменения  $\lambda$ .

## Давление света

Величину давления  $P$  можно рассчитать, предполагая, что фотон – частичка, испытывающая упругий удар, который сопровождается изменением импульса



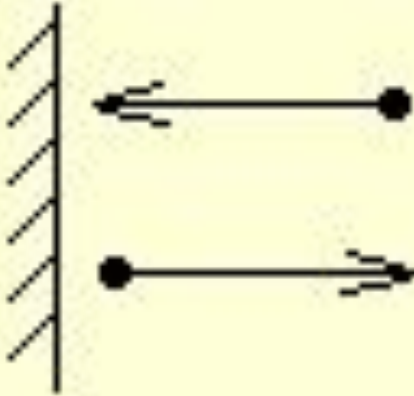
*Давление света направляет  
хвост кометы от Солнца*



*Солнечный парус*



# Давление света



$R$  – коэффициент отражения света или доля фотонов, соударяющихся со стенкой упруго;  $(1-R)$  – неупруго;

$n$  – плотность фотонов;

$(c \cdot n)$  – количество фотонов, которое ударяется о единичную площадку в единицу времени;

$W = hv \cdot n$  – плотность энергии поля.

Изменение импульса фотонов, падающих на единичную площадку в единицу времени:

а) для поглощенных фотонов:

$$\Delta K = n \cdot c \cdot (1-R) \frac{hv}{c} = (1-R) \cdot W$$

б) для отраженных фотонов:

$$\Delta K = n \cdot c \cdot R \cdot 2 \frac{hv}{c} = 2 \cdot R \cdot W$$

$\Delta K = F \cdot \Delta t$ , где  $F$  – сила давления на единичную площадку.

Так как  $\Delta t = 1$ , а  $F = P$ , то

$$P = (1-R) \cdot W + 2 \cdot R \cdot W = (1+R) \cdot W = (1+R) \cdot \frac{W}{c} \cdot c$$

$$P = \frac{E_{\text{э}}}{c} (1+R)$$

$W \cdot c = E_{\text{э}}$  – энергетическая освещенность поверхности

Давление солнечного света на земную поверхность  $P = 10^{-6} - 10^{-5} \text{ Н/см}^2$

# Давление света - опыт П.Н. Лебедева

(1899-1900 г.)

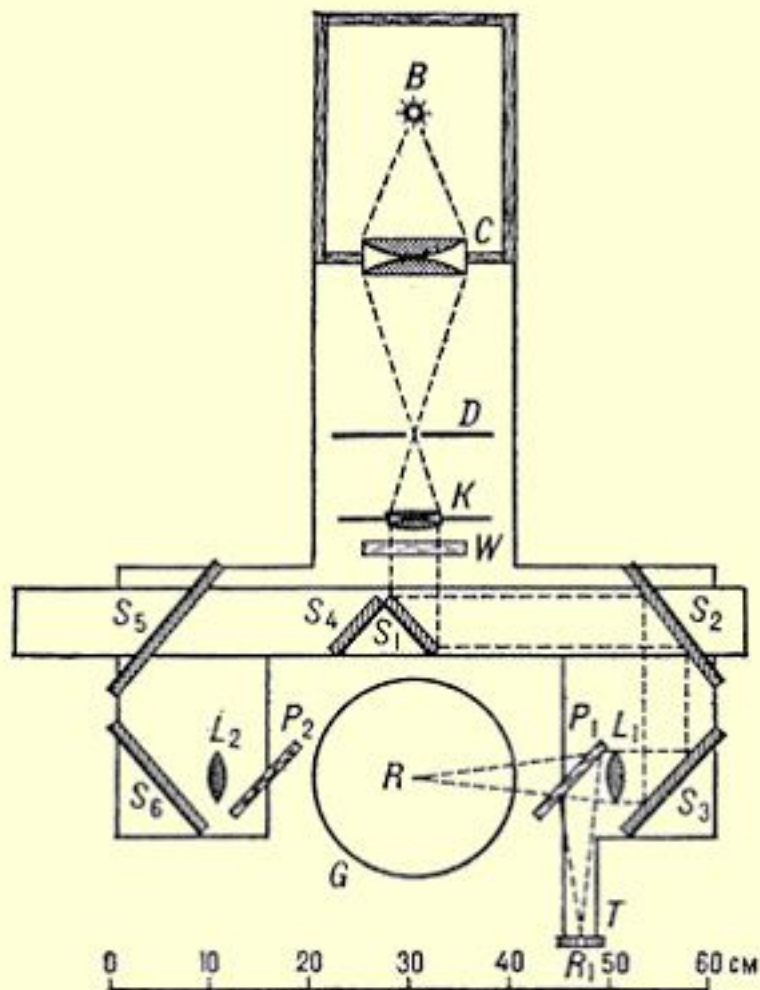
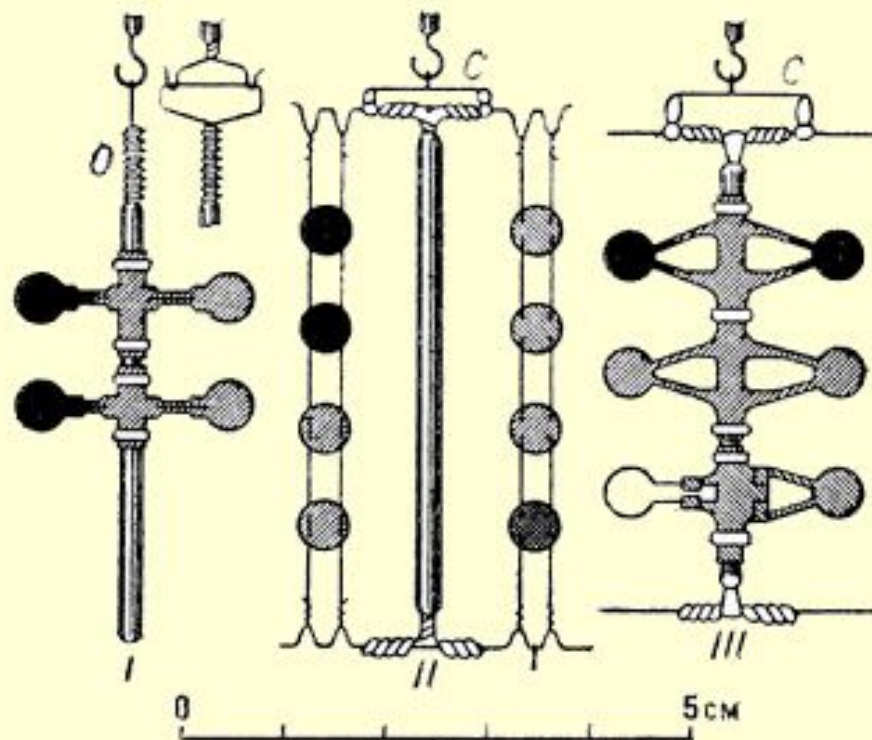


Схема опыта



Системы крылышек в опыте Лебедева



# Люминесценция



Люминесценцией называется излучение, избыточное по отношению к равновесному тепловому излучению, обладающее длительностью, превышающей период светового колебания ( $\tau \gg T$ ).

## Виды люминесценции по типу первичного энергетического воздействия

- **электролюминесценция** – излучение света под действием электрического поля;
- **фотолюминесценция** – поглощение фотонов света с одной частотой, а излучение с другой;
- **катодолюминесценция** – процесс преобразования электрического луча в энергию видимого света;
- **рентгенолюминесценция** – излучения света под действием электрических лучей;
- **триболюминесценция** – излучения света под действием механических воздействий

# Фотолюминесценция

*Длительность свечения  $\tau$  – время, в течение которого тело высвечивает энергию возбуждения.*

## Виды фотолюминесценции

### **Флюоресценция**

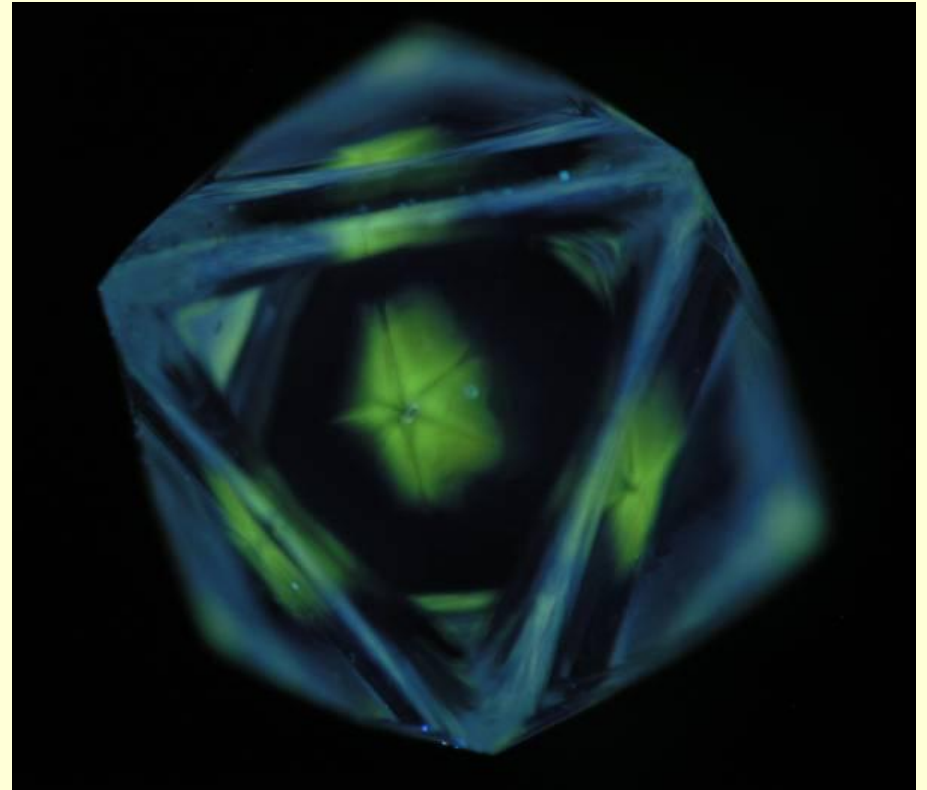
в газах и жидкостях

$$\tau \approx 10^{-9} - 10^{-4} \text{ с.}$$

### **Фосфоресценция**

в твердых телах

$$\tau \approx 1 - 10^6 \text{ с.}$$

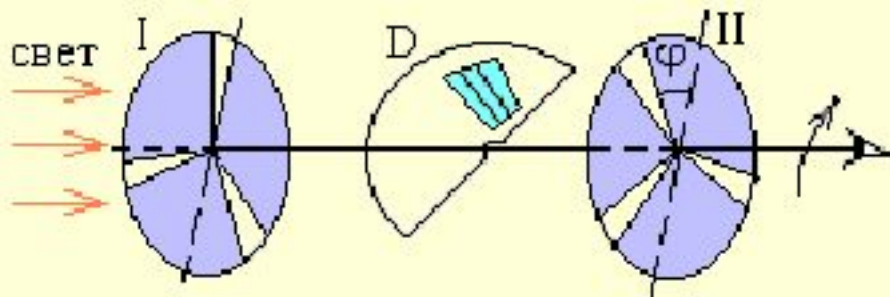


*Фотолюминесценция алмаза*



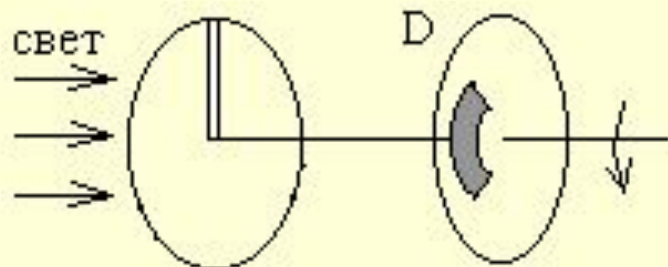
# Методы исследования фотолюминесценции

## 1. Двухдисковый фосфороскоп Беккереля



Измерение длительности послесвечения до  $10^{-4}$  с

## 2. Однодисковый фосфороскоп



Измерение длительности послесвечения до  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  с

## 3. Фазовый флюориметр

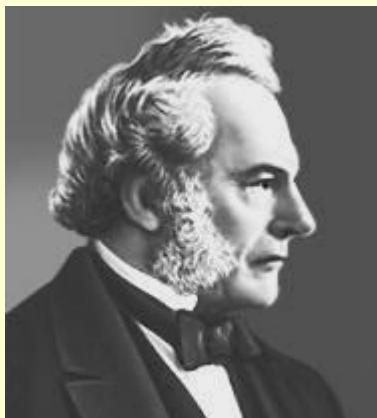
$$\Delta\varphi = \omega \cdot \tau$$

Измерение длительности послесвечения до  $10^{-8}$  -  $10^{-9}$  с

Закон затухания фотолюминесценции:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha t}, \quad I \propto e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\tau$  – время запаздывания



Стокс(Stokes) Джордж  
Габриель (1819 -1903)

## Спектр фотолюминесценции

Наряду с линией  $\nu = \nu_0$  в спектре люминесценции будут и линии других частот с  $\nu < \nu_0$  - *правило Стокса*.

Линии с  $\nu_{\text{л}} > \nu_0$  возникают при поглощении квантов  $h\nu_0$  уже возбужденными атомами. Область спектра  $(\nu_{\text{л}} - \nu_0) > 0$  называется *антистоксовой областью*.

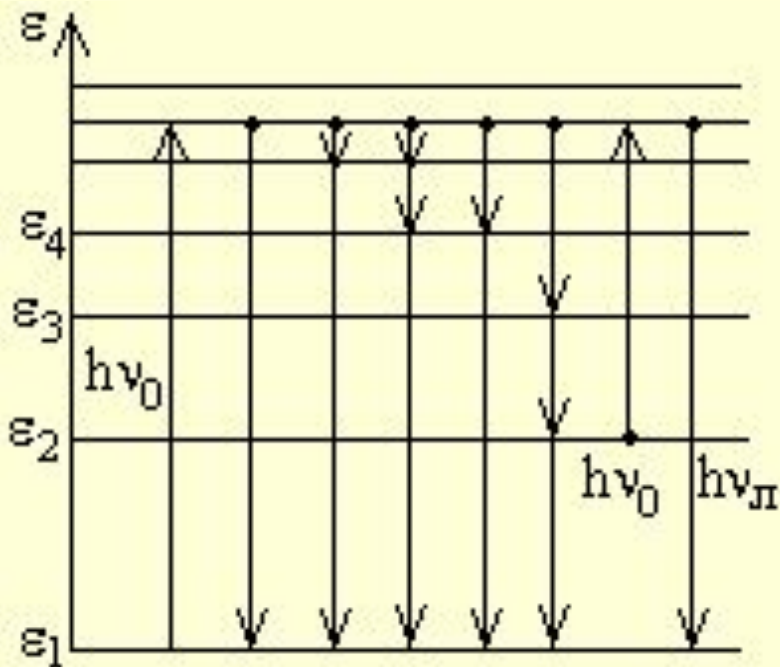


Диаграмма переходов



## Особенности спектра фотолюминесценции



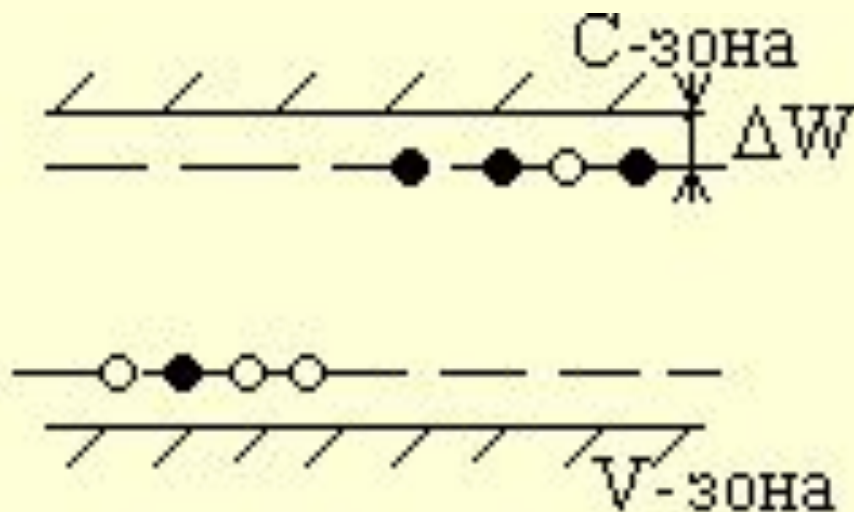
- Максимум спектра флуоресцентных линий смещен в сторону больших длин волн относительно максимума спектра поглощения.
- Спектр фотолюминесценции не зависит от того, светом какой частоты, соответствующим данной полосе поглощения, возбуждена фотолюминесценция. Спектр фотолюминесцентных линий специфичен для данного вещества.
- Правило зеркальной симметрии Левшина - для некоторых классов органических молекул.



## Вещества, способные люминесцировать



- Органические соединения, растворы органических соединений, например, растворы органических красителей, растворы хинина, керосин, машинное масло, нефтепродукты.
- Растворы солей редкоземельных элементов.
- При наличии соответствующих примесей можно заставить люминесцировать любой неметаллический (полупроводник, диэлектрик) кристалл (Zn, Cd, Co). Они называются фосфорами, добавки – активаторами (тяжелые примеси).



*Роль активаторов*



## Применение люминесценции



- Преобразование невидимого излучения (ультрафиолетового, рентгеновского) в видимое.
- Пересадка излучения на более удобную частоту (в люминесцентных лампах).
- Люминесцентный анализ для обнаружения малых концентраций различных веществ по характерному для них спектру и интенсивности люминесценции (в геологоразведке, криминалистике и т.д.). Минимальная обнаруживаемая концентрация:  $C_{\min} = 10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>; масса -  $\Delta m = 10^{-10}$  г.
- В счетчиках элементарных частиц.

## Применение люминесценции



**Лампа Вуда САПФИР** для  
проведения  
люминесцентного анализа  
при диагностике грибковых  
поражений зерна



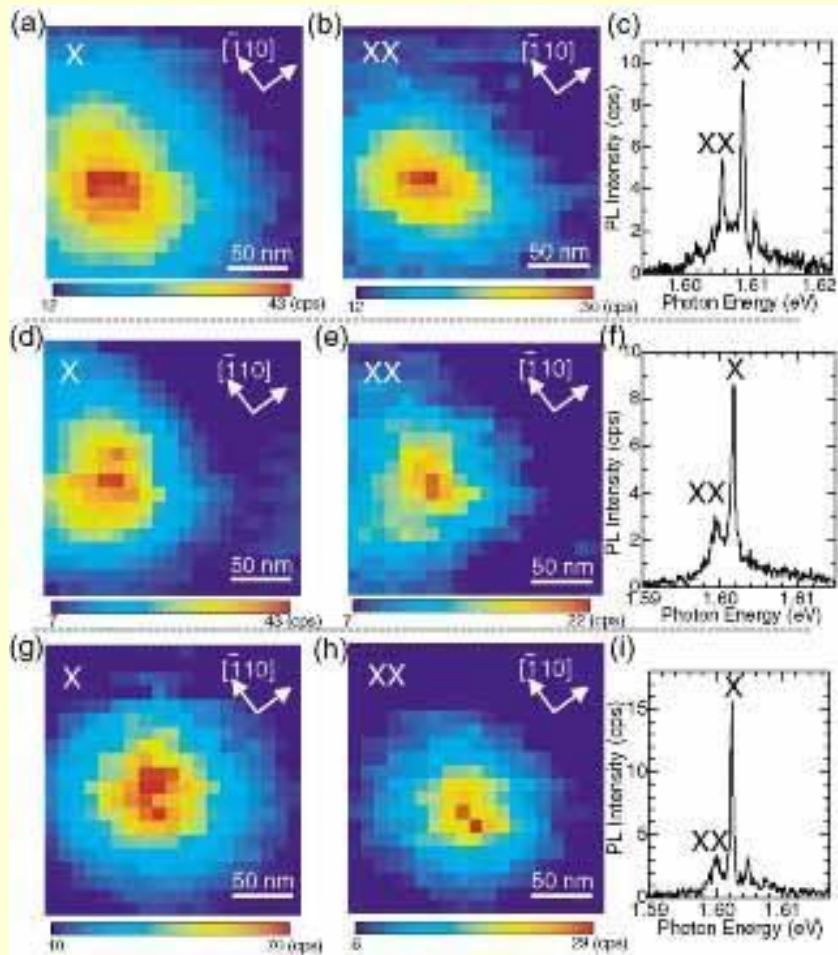
**Люминометр** для всех видов  
люминесцентного анализа

**Люминесцентный  
светильник**





# Люминесценция в нанотехнологиях



*a, d, g - изображения пространственного распределения интенсивности экситонной фотолюминесценции для нескольких квантовых точек; c, f, i - спектры фотолюминесценции для тех же квантовых точек (X - линия излучения экситона; XX - линия излучения биэкситона). Цветовая шкала показывает интенсивность излучения (в фотоотчетах в секунду).*

<http://www.scientific.ru/journal/news/1203/n241203.html>

**Квантовая точка** представляет собой специальным образом полученный наноразмерный объект, обладающий дискретным энергетическим спектром.