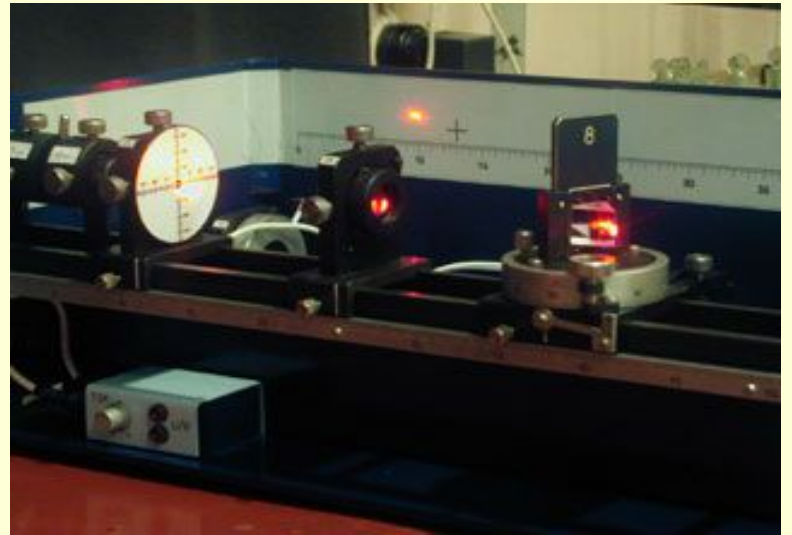


Оптика и квантовая физика

для студентов
2 курса ФТФ и ГГФ



Кафедра общей физики



Квантово-оптические явления

Часть 1

- Тепловое излучение
- Внешний фотоэффект

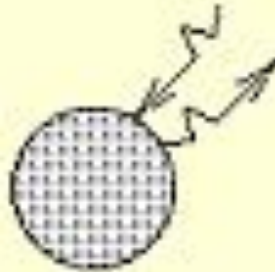


Тепловое излучение



Виды излучения:

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

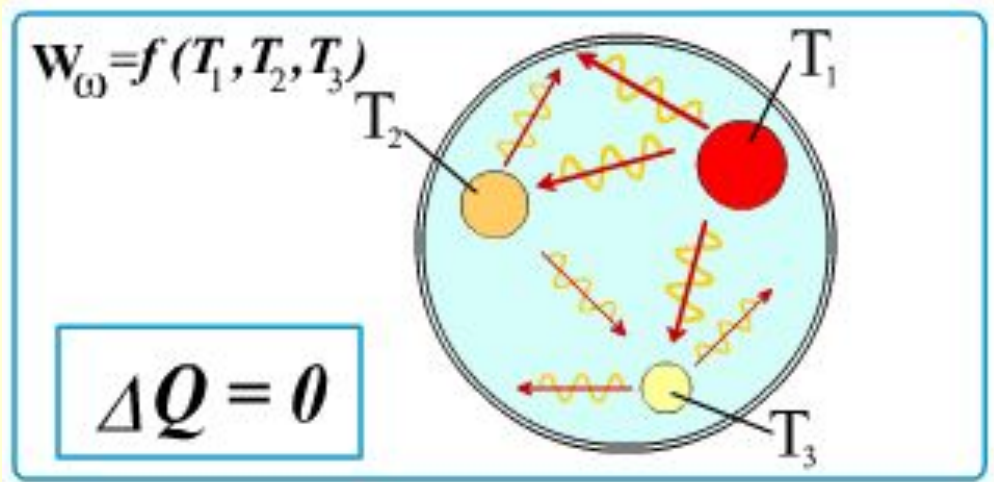


Тепловое излучение - электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств тела.



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

$$R = d\Phi/dS$$

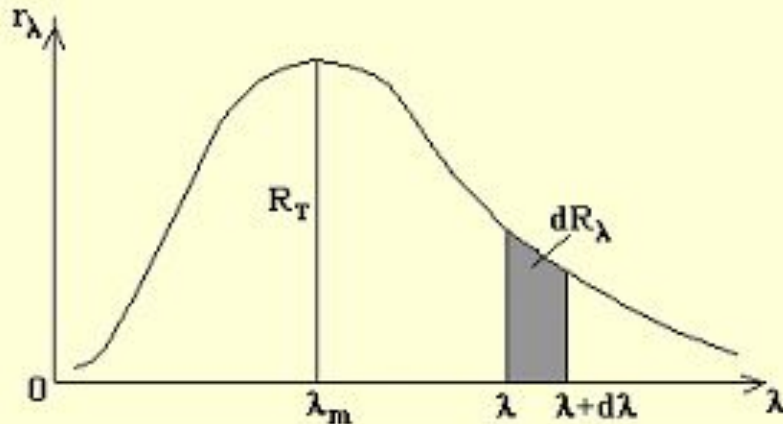
- энергетическая светимость или интегральная испускательная способность, где Φ – поток энергии или мощность излучения

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

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

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

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



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

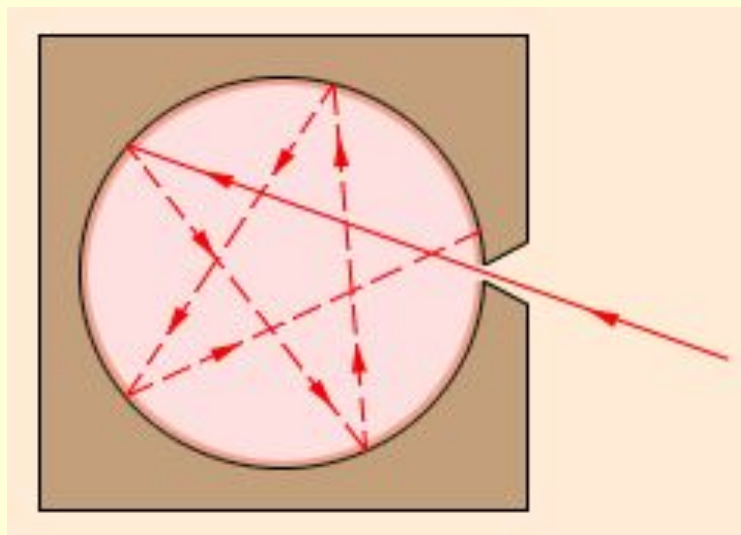
Характеристики теплового излучения



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



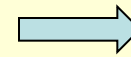
Закон Кирхгофа

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

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

Для абсолютно черного тела

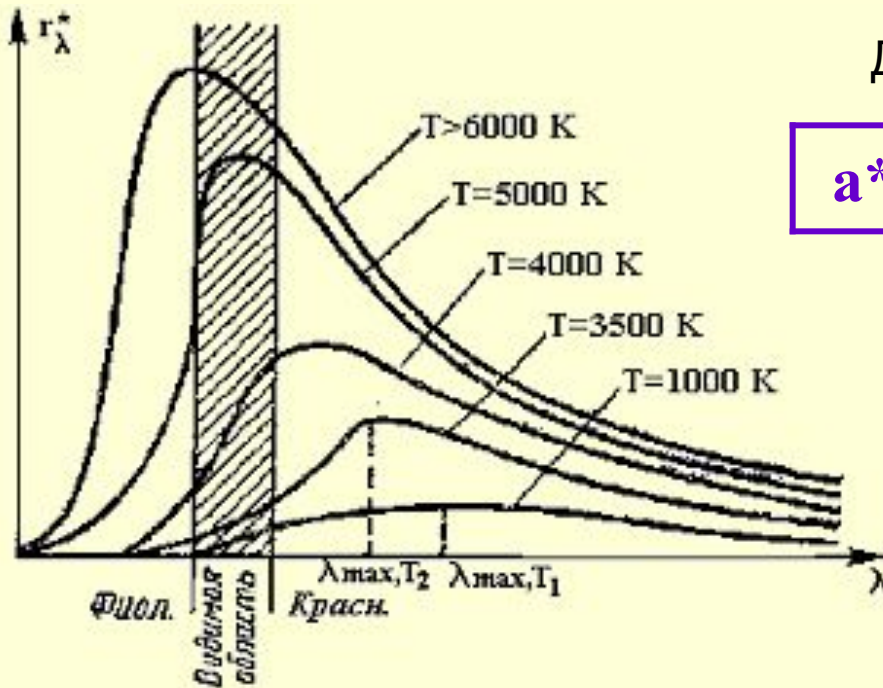
$$a_{\lambda,T}^* = 1$$



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

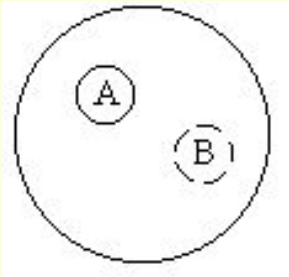


$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}^*$$

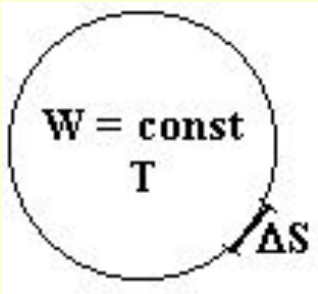


Доказательство закона Кирхгофа

T/δ равновесие с температурой T



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



ΔS - абсолютно черное тело

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

Абсолютно черное тело
– замкнутая оболочка с
температурой T

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

ΔS - не абсолютно черное тело

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



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

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



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

Следствия из закона Кирхгофа



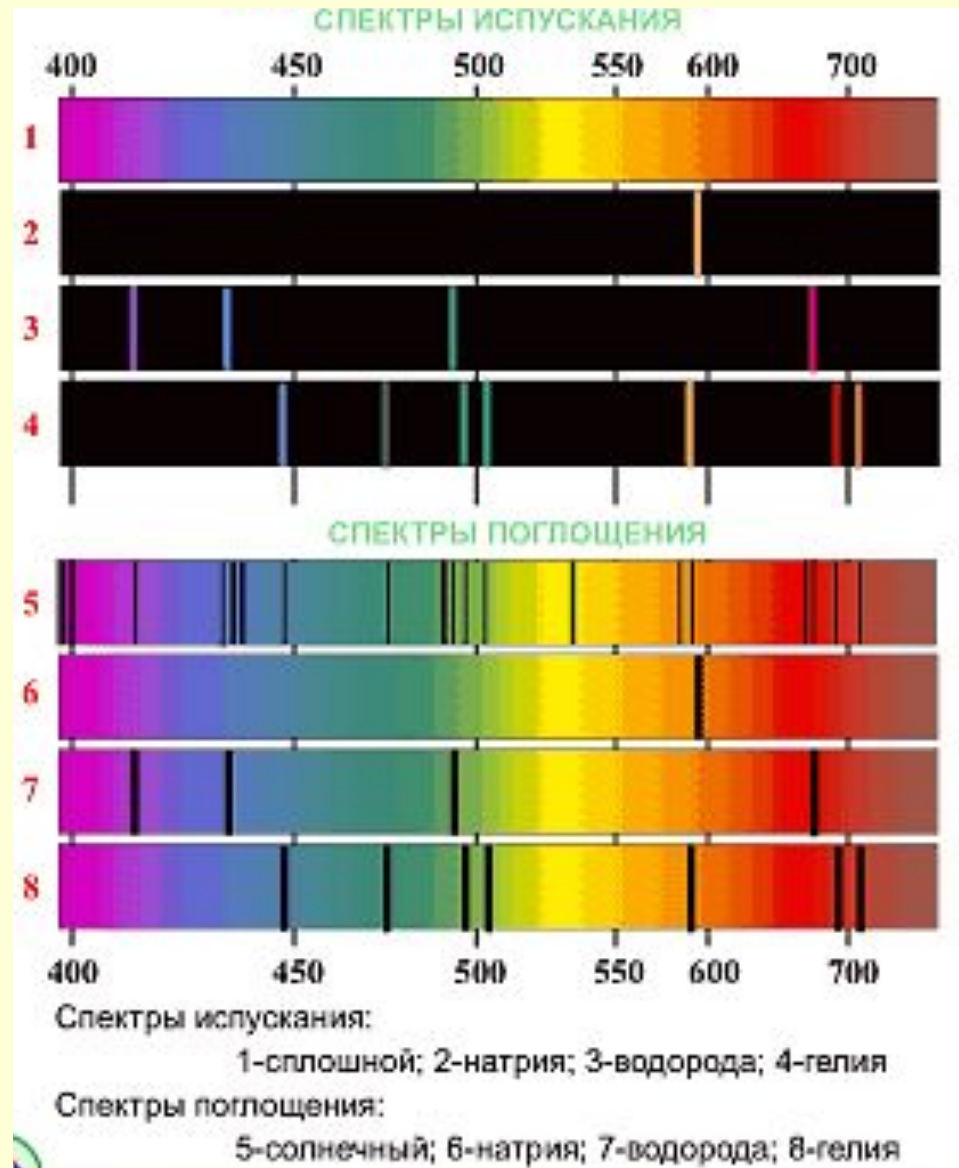
1. $r_{\lambda,T}$ и $a_{\lambda,T}$ не независимы: чем больше $a_{\lambda,T}$, тем больше $r_{\lambda,T}$;

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

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 λ , 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.

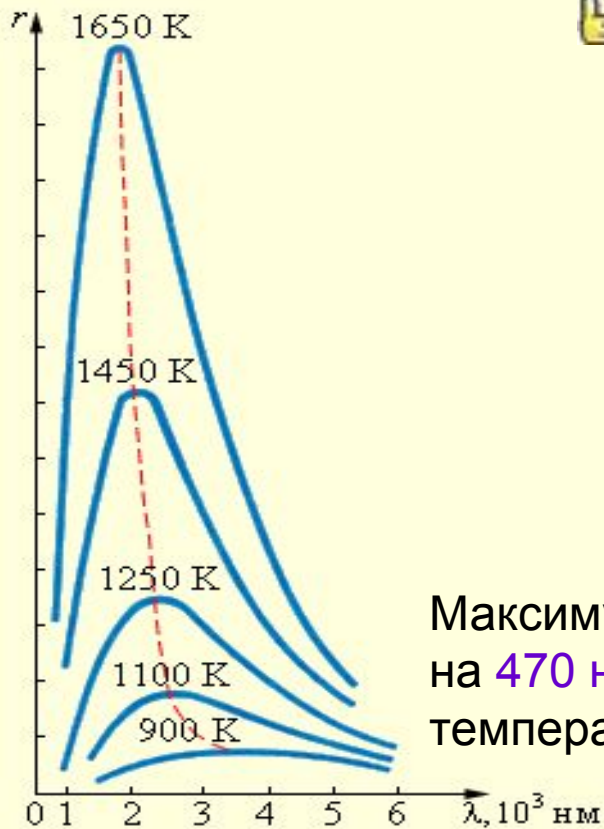


Закон смещения Вина (1893 г.)

$$\lambda_m \cdot T = b$$

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

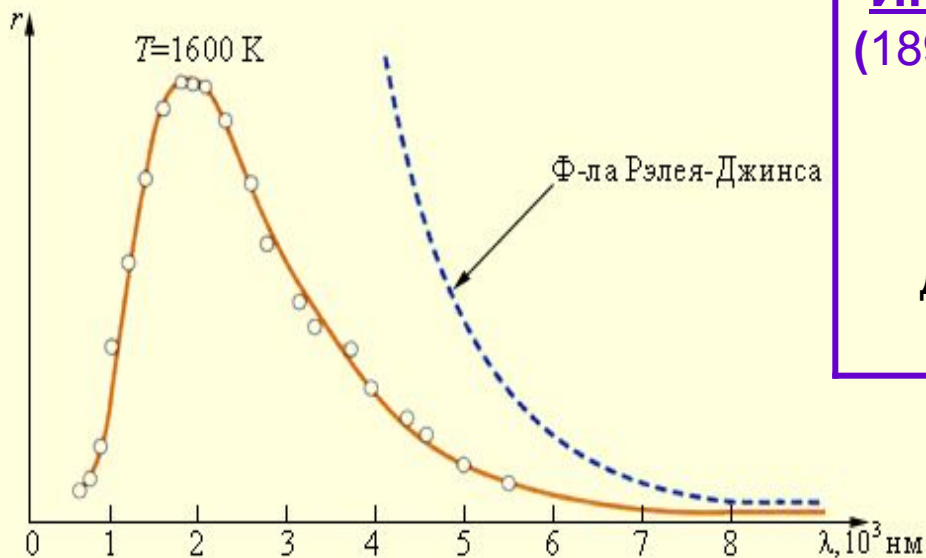
λ_{max} – длина волны, соответствующая
максимальному значению $r^*_{\lambda, T}$



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 Рэлея – 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 Рэлея – 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 δ экспериментально, нашли $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.





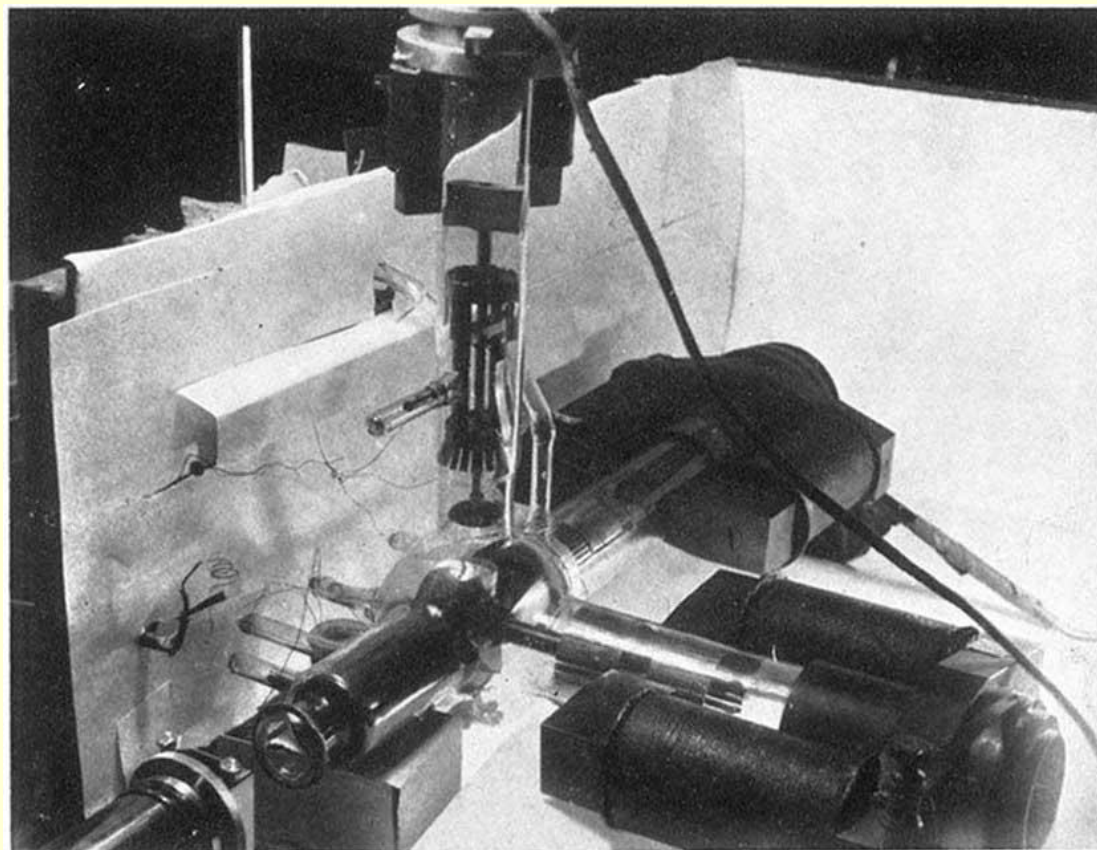
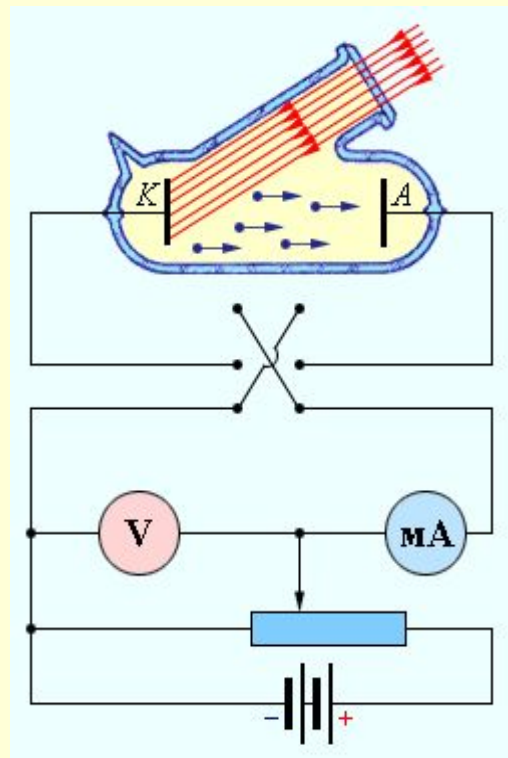
Г. Герц



Внешний фотоэффект

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

Экспериментальное изучение фотоэффекта



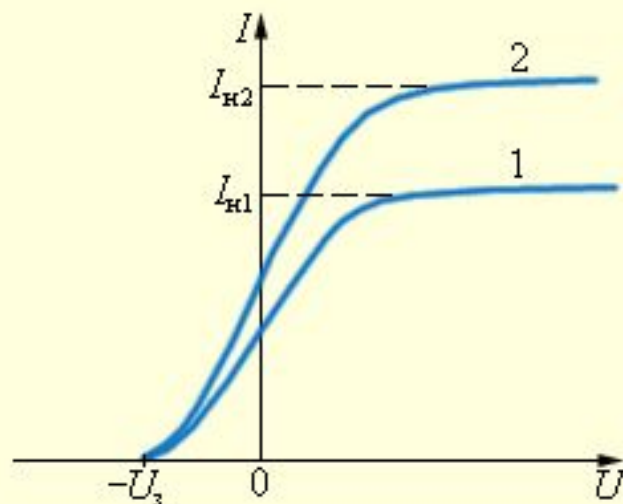
Фотография установки Р. Милликена (1916г.)





А.Г. Столетов

Законы внешнего фотоэффекта

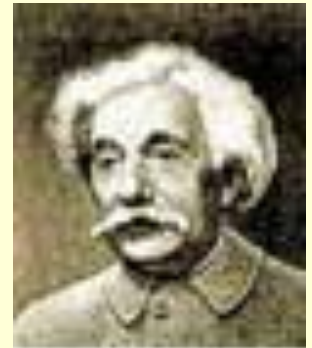


Вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента.
Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.

1. Фототок насыщения пропорционален световому потоку, падающему на металл $I_{\text{н}} \sim \Phi$, 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 ν_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.

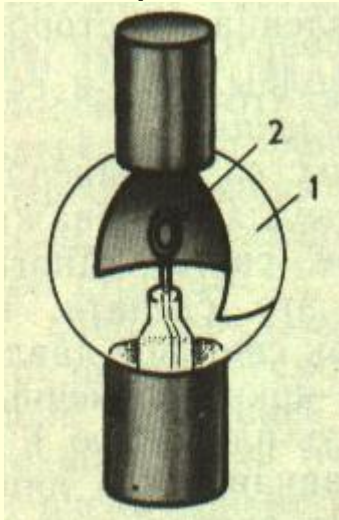
Применение фотоэффекта

фотоэлектронные приборы

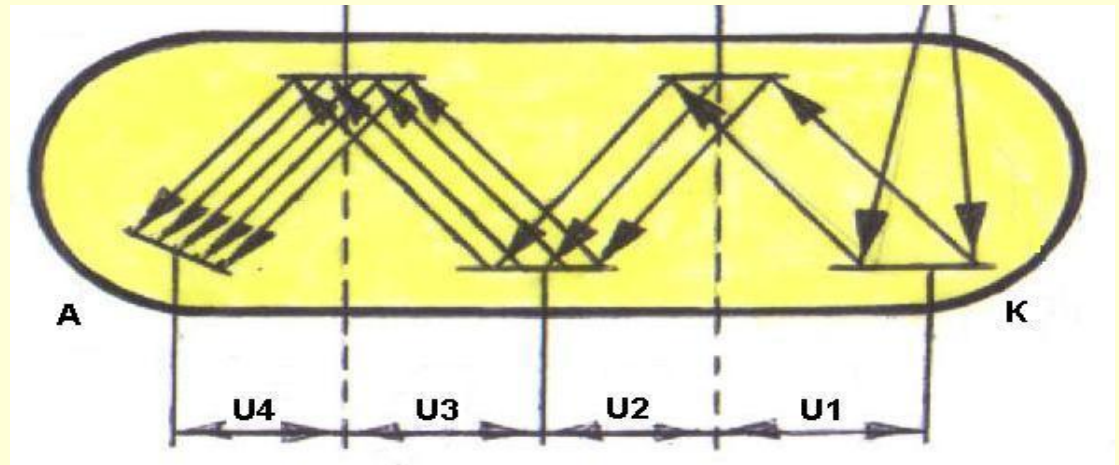
фотоэлементы

фотоумножители

Преобразование
светового сигнала
в электрический



Измерение очень малых
световых потоков



В астрономии,
спектроскопии и т.д.

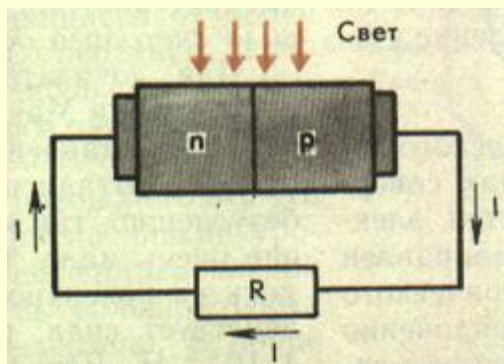
В метро, в фотометрии для измерения силы света, яркости, освещенности, в кино для воспроизведения звука, в фототелеграфах и фототелефонах, в управлении производственными процессами, на заводских прессах и т. д.

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

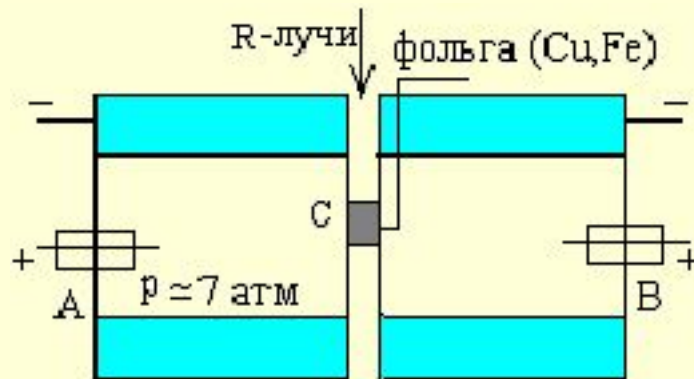
Развитие гипотезы световых квантов

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*

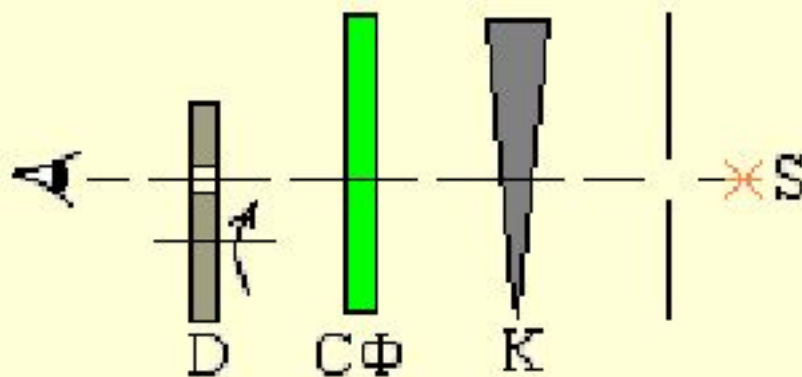


Схема опыта Вавилова С. И.:

D – диск вращающийся со счетчиком поворотов;

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

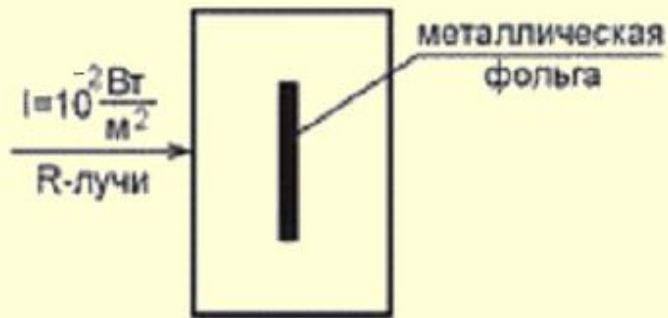
K – клин из дымчатого стекла.

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 λ рентгеновского излучения при его рассеянии.

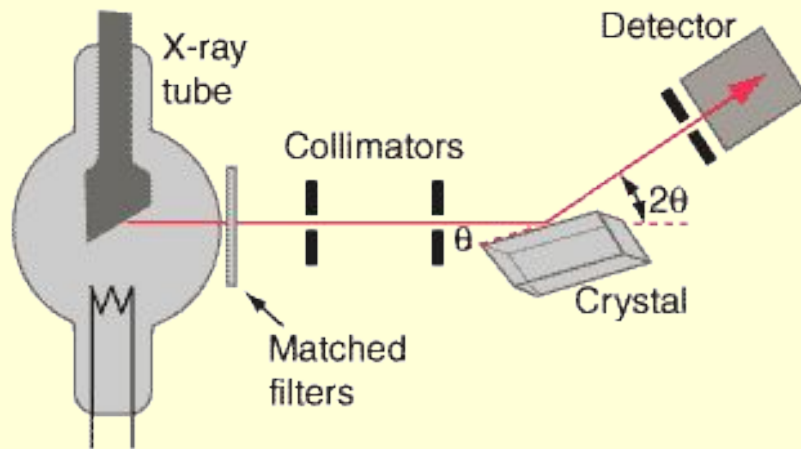


Рис. 1 Рентгеновский спектрометр У.Г.Брэгга

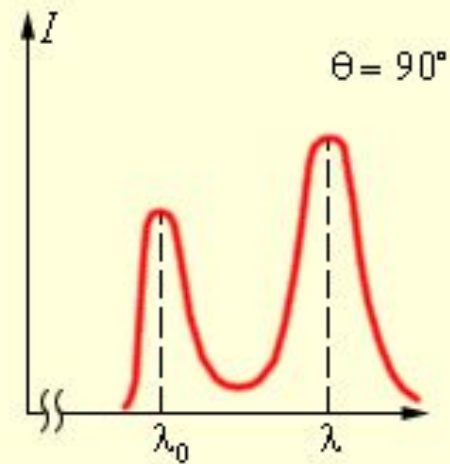
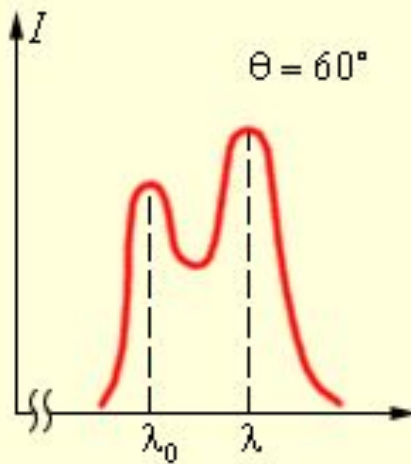
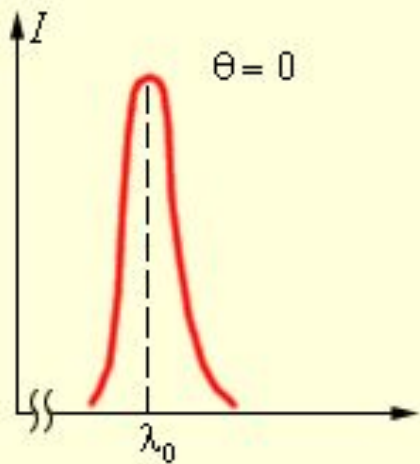
Схема опыта



Результаты опыта:

1. В рассеянном излучении присутствовали излучения с длинами волн λ 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 λ и природы рассеивателя.

Эффект Комптона



Спектры рассеянного излучения

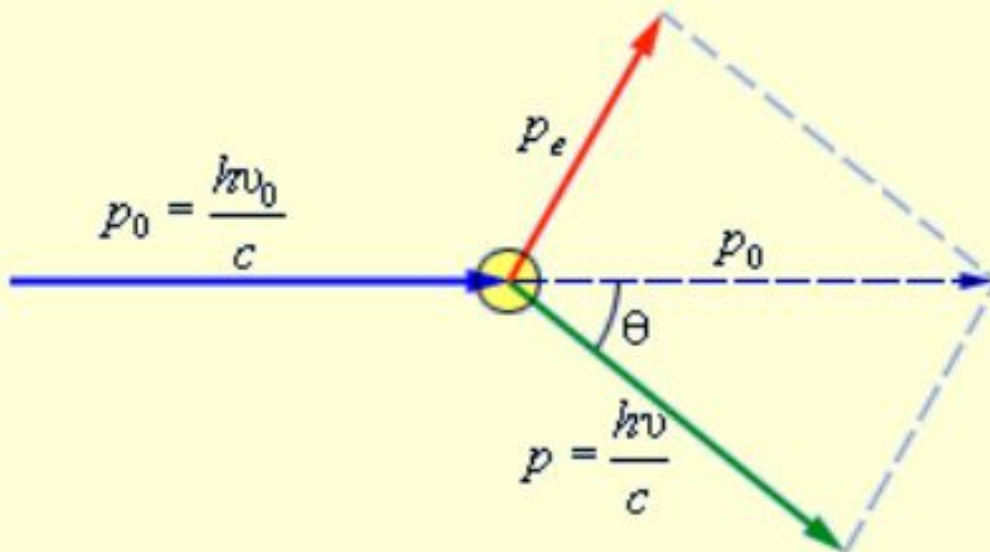


Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне.

Теория эффекта Комптона

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

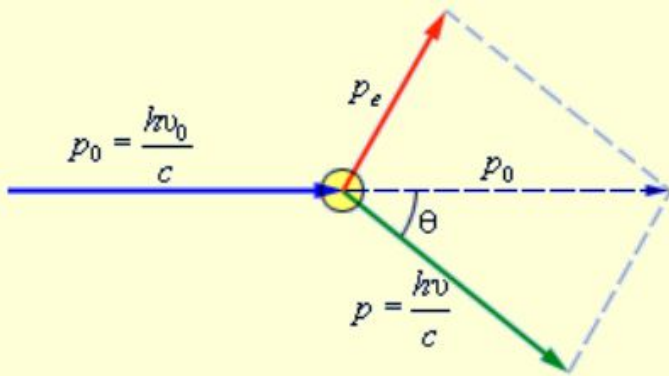
– по закону сохранения энергии, где m_0 и m – масса электрона до и после столкновения

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

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

– 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,
 $\lambda_K = 0,024 \text{ \AA}$

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

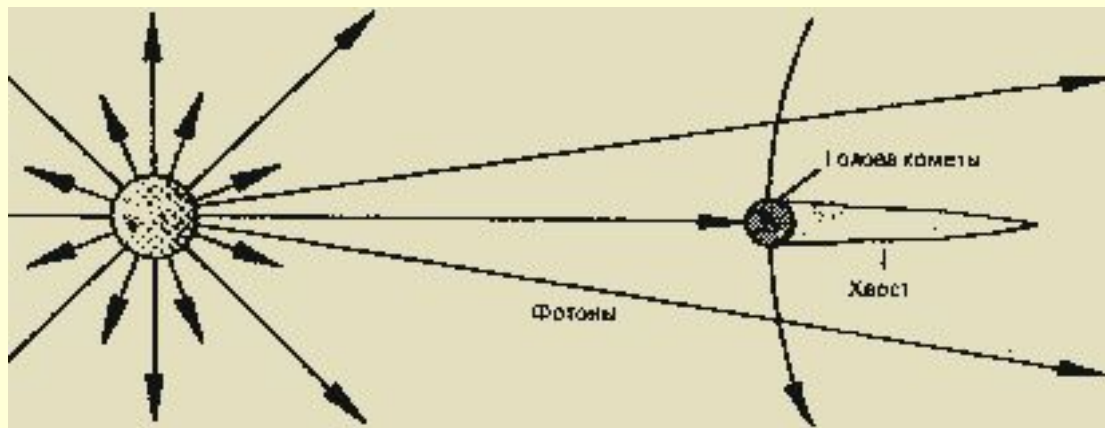
Формула Комптона



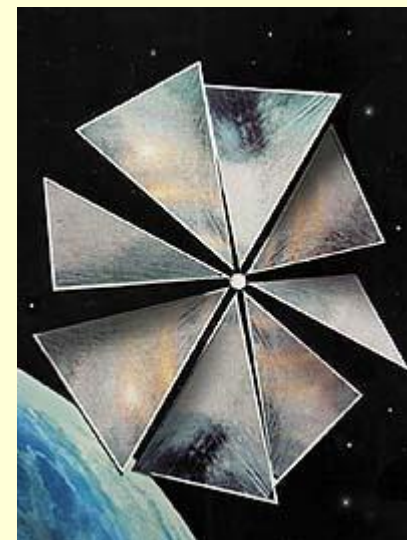
Наличие рассеянного излучения с длиной волны λ можно объяснить тем, что взаимодействуя с внутренними электронами (сильно связанными с атомом), фотон взаимодействует как бы с атомом в целом. Так как масса атома много больше массы фотона, то фотон отскакивает от него с той же энергией, а значит, без изменения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

Давление света

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



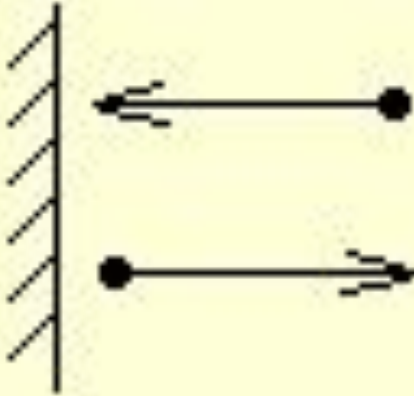
*Давление света направляет
хвост кометы от Солнца*



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;

$W = h\nu \cdot n$ – плотность энергии поля.

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

а) для поглощенных фотонов:

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

б) для отраженных фотонов:

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

$\Delta K = F \cdot \Delta t$, 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.)

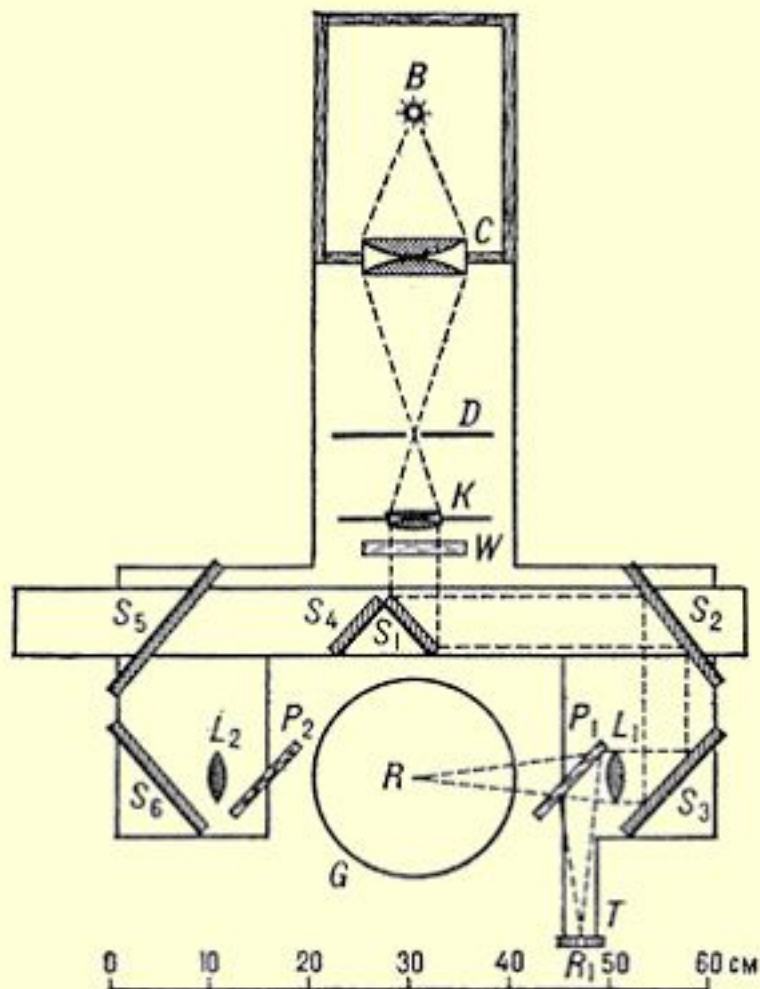
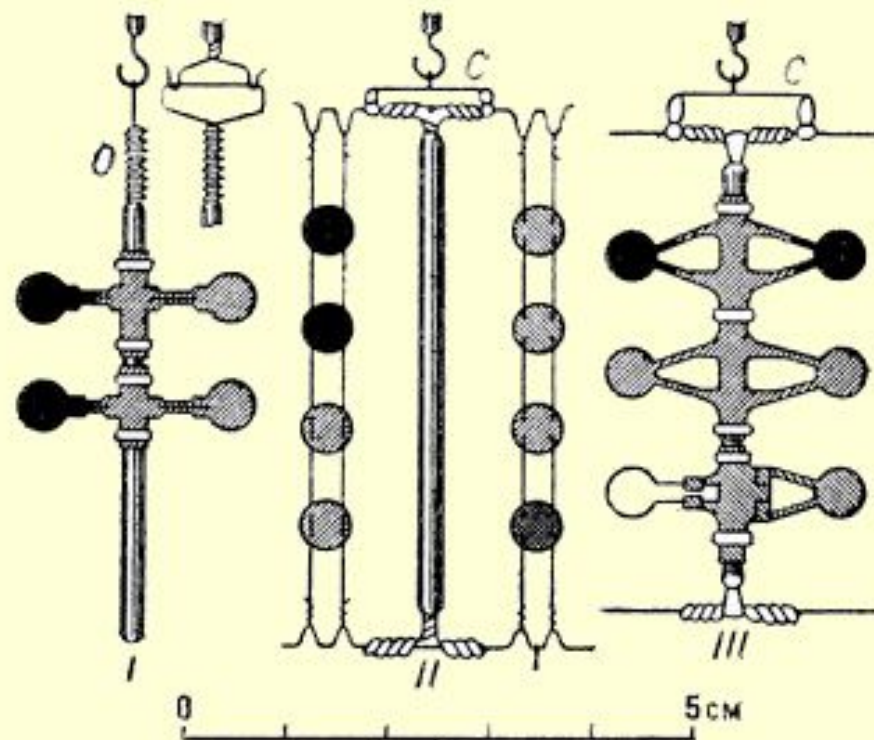


Схема опыта



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 τ – время, в течение которого тело высвечивает энергию возбуждения.

Виды фотолюминесценции

Флюоресценция

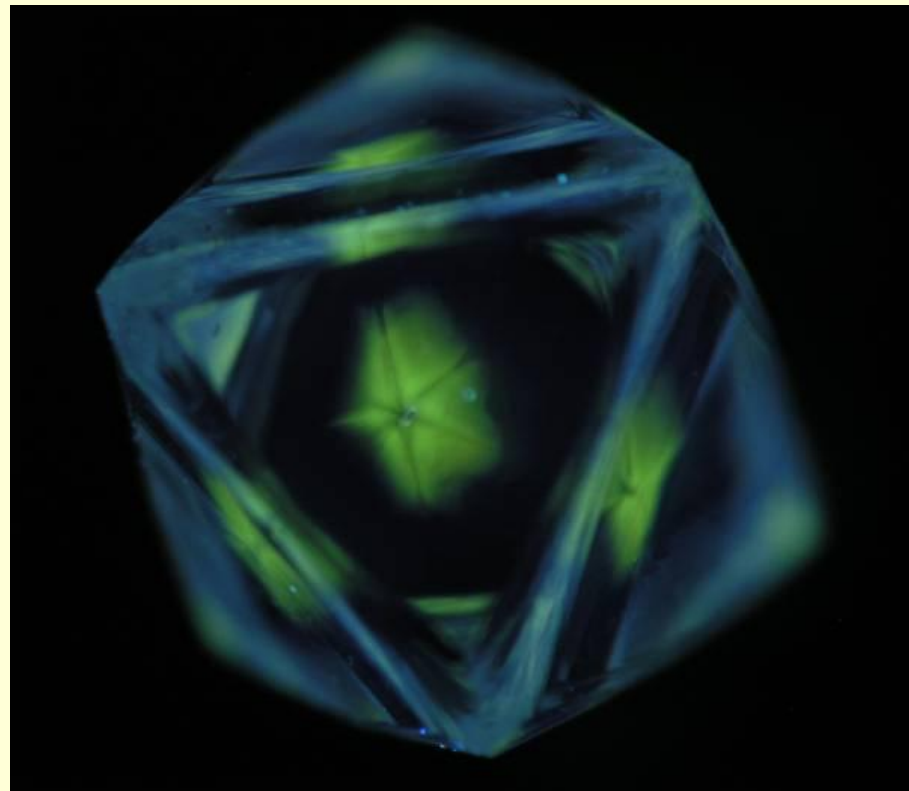
в газах и жидкостях

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

Фосфоресценция

в твердых телах

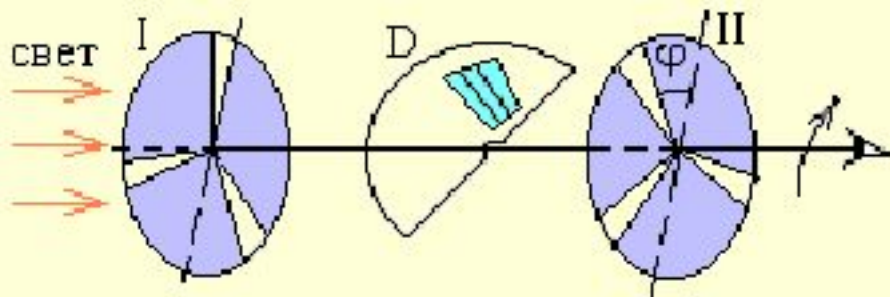
$$\tau \approx 1 - 10^6 \text{ с.}$$



Фотолюминесценция алмаза

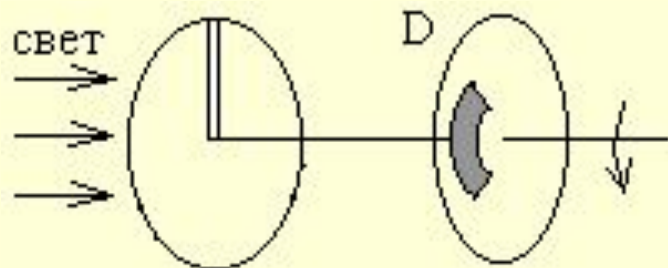
Методы исследования фотолюминесценции

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

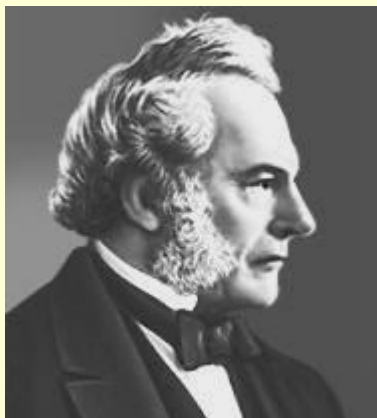
$$\Delta\varphi = \omega \cdot \tau$$

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

Закон затухания фотолюминесценции:

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

τ – 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*.

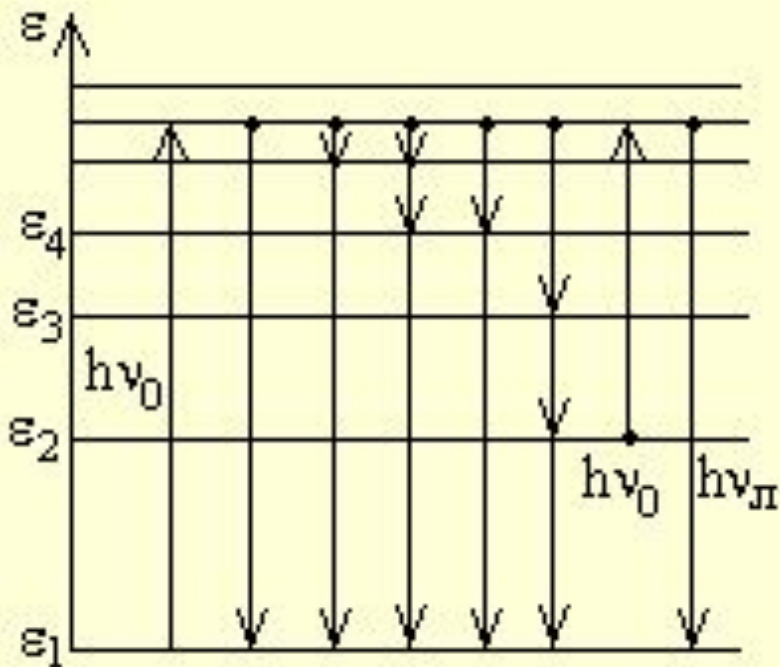


Диаграмма переходов



Особенности спектра фотолюминесценции



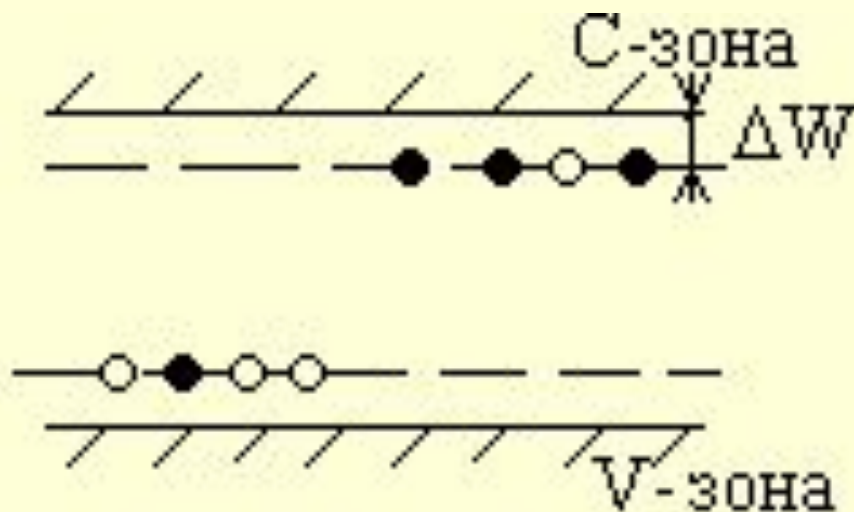
- Максимум спектра флуоресцентных линий смещен в сторону больших длин волн относительно максимума спектра поглощения.
- Спектр фотолюминесценции не зависит от того, светом какой частоты, соответствующим данной полосе поглощения, возбуждена фотолюминесценция. Спектр фотолюминесцентных линий специфичен 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: $C_{\min} = 10^{-9} \text{ г/см}^3$; масса - $\Delta m = 10^{-10} \text{ г}$.
- В счетчиках элементарных частиц.

Применение люминесценции



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

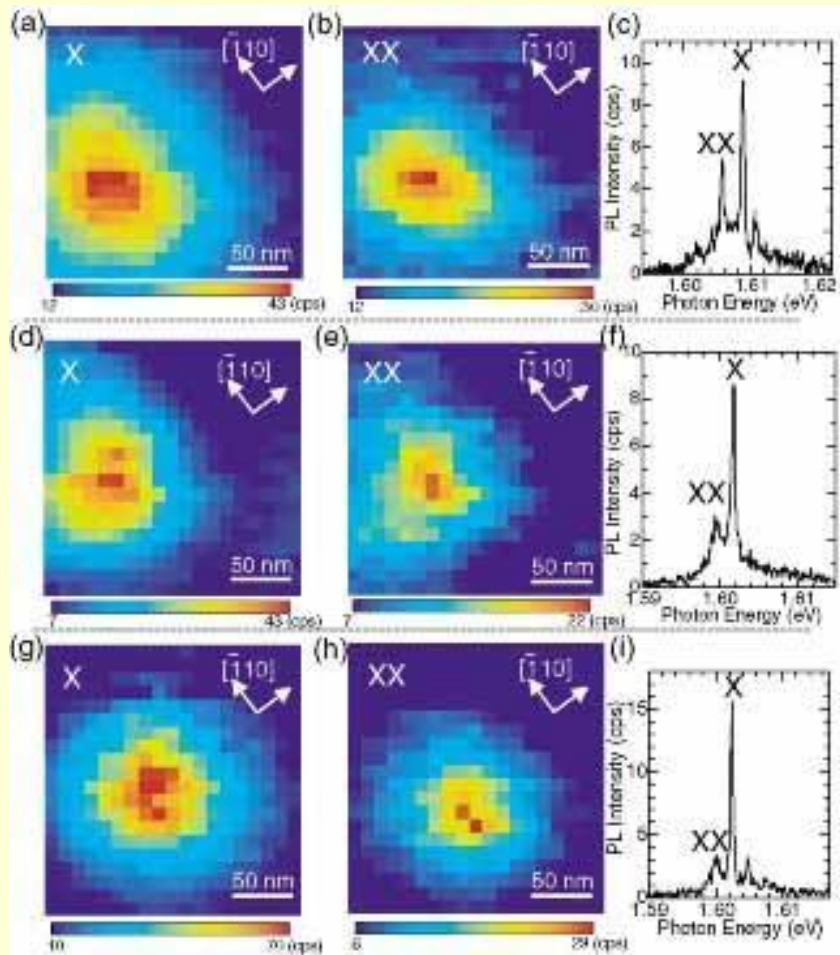


Люминометр для всех видов
люминесцентного анализа

**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 фотоотсчетах в секунду).

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

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