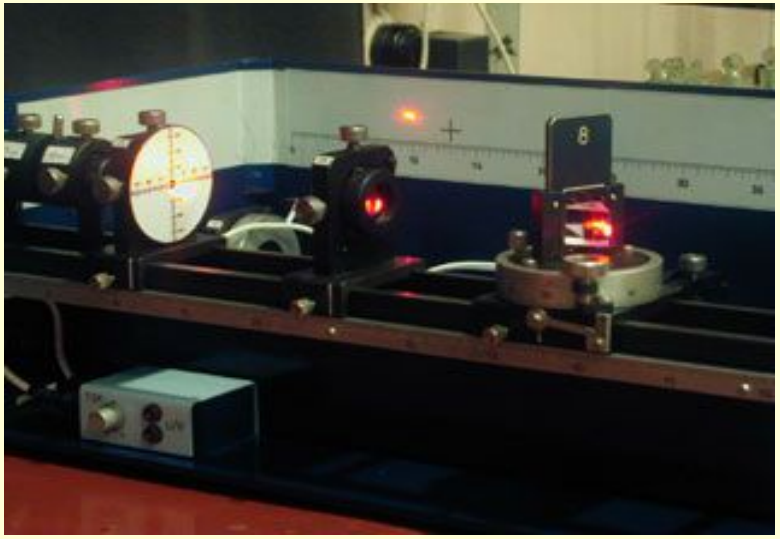
Оптика и квантовая физика



для студентов
2 курса ФТФ и ГГФ

Кафедра общей физики

Лекция 7

Квантово-оптические явления

Часть 1

- Тепловое излучение
- Внешний фотоэффект

Тепловое излучение

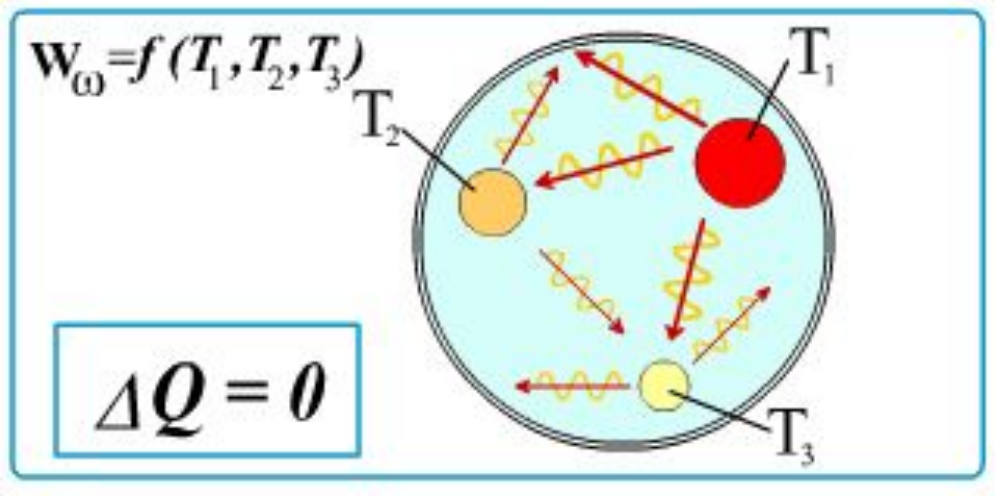
Виды излучения:

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. $\Delta U_{излуч.} + \Delta U_{погл.} = 0$



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

$$R = d\Phi/dS$$

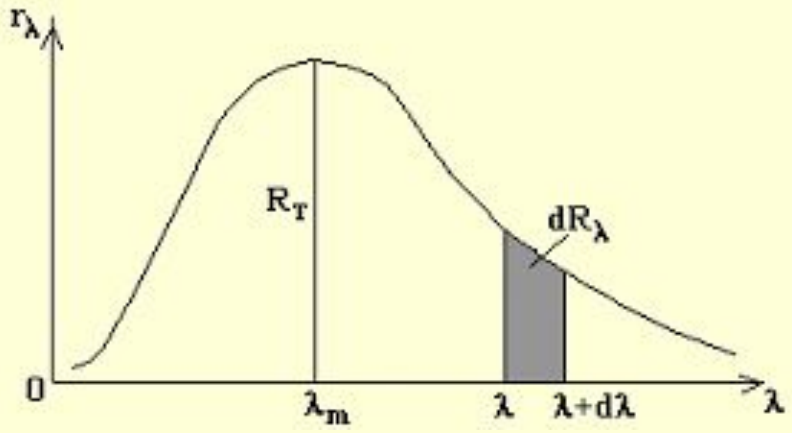
- энергетическая светимость или интегральная испускательная способность, где **Ф** – поток энергии или мощность излучения

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

- 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.

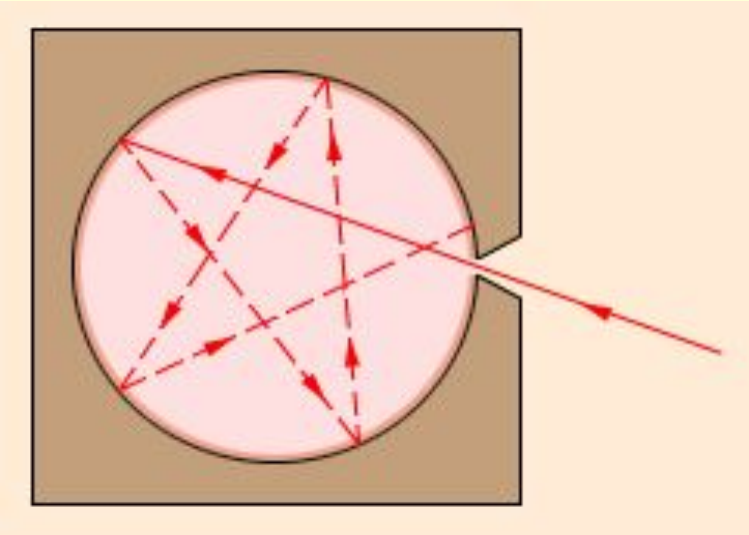


$$R = \int_0^\infty dR_\lambda = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda$$

Характеристики теплового излучения

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

Модель абсолютно черного тела



$$a^*_{\lambda,T} = 1$$

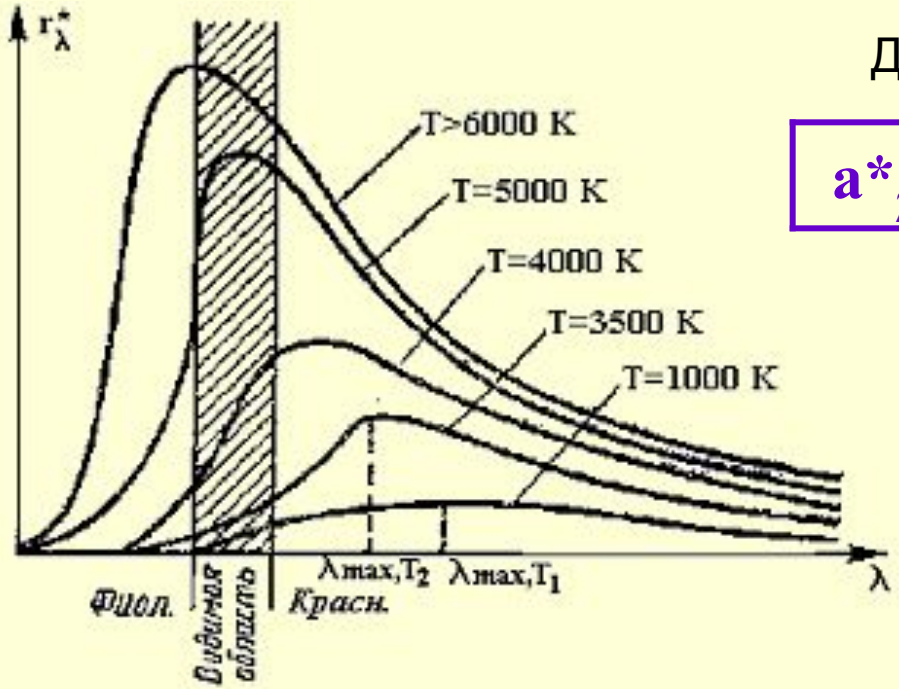
Коэффициент черноты − отношение энергетической светимости тела к энергетической светимости ***АЧТ***. Если коэффициент черноты меньше единицы и не зависит от частоты излучения, то тело называют ***серым***. Если коэффициент черноты различен в различных частях спектра, то тело называют ***селективным***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

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f(\lambda, T)$$



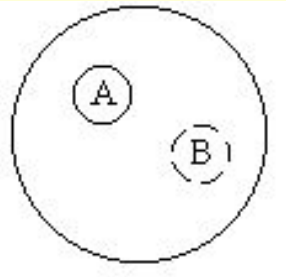
Для абсолютно черного тела

$$a^*_{\lambda,T} = 1 \Rightarrow f(\lambda, T) = r^*_{\lambda,T}$$

$$\Downarrow$$

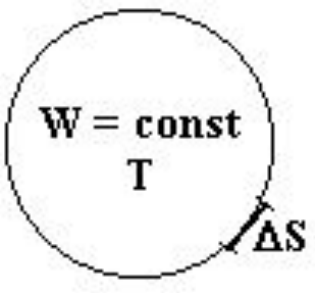
$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r^*_{\lambda,T}$$

Доказательство закона Кирхгофа



Т/д равновесие с температурой Т

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



ΔS - абсолютно черное тело

Энергия, которую участок ΔS излучает за единицу времени и получает от остальной оболочки в спектральном интервале dλ:

Абсолютно черное тело – замкнутая оболочка с температурой Т

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

ΔS - не абсолютно черное тело

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

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

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

$$\Downarrow$$

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

Следствия из закона Кирхгофа

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

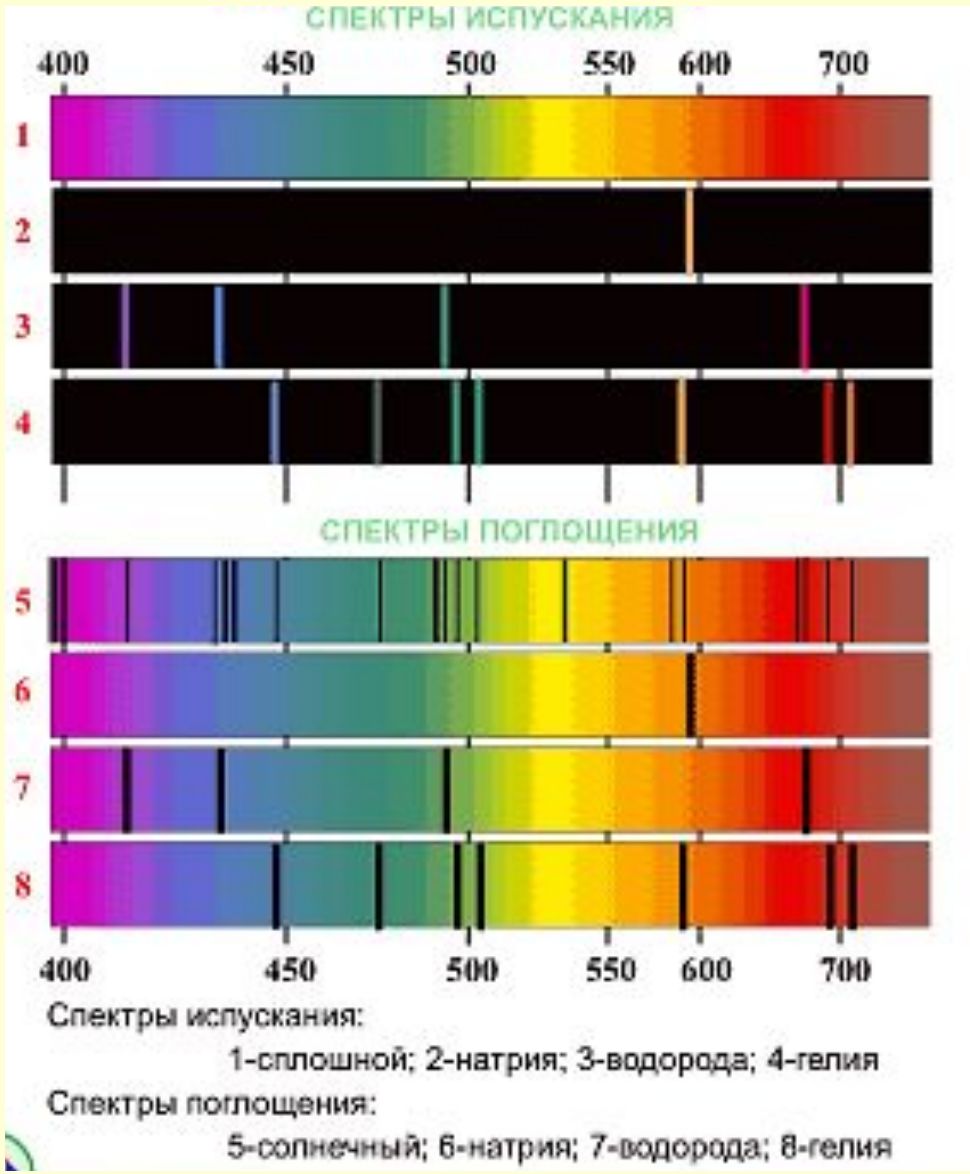
2. $$\left.\begin{array}{l} r_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot r^*_{\lambda,T} \\ \text{для всех нечерных тел } a_{\lambda,T} < 1 \end{array}\right\} \Rightarrow r_{\lambda,T} < r^*_{\lambda,T}$$

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.

Видео

Законы теплового излучения



Спектры испускания:

1-сплошной; 2-натрия; 3-водорода; 4-гелия

Спектры поглощения:

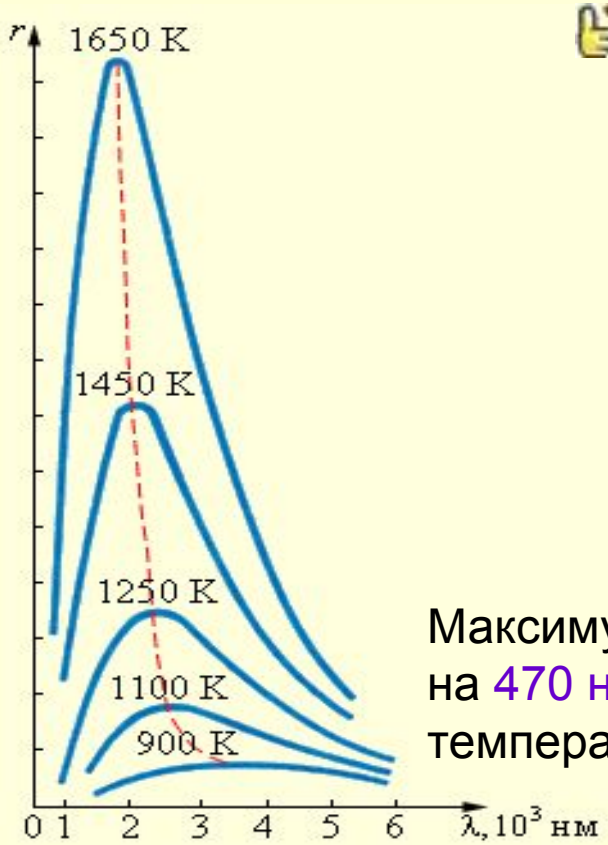
5-солнечный; 6-натрия; 7-водорода; 8-гелия

Законы теплового излучения

Закон Стефана – Больцмана

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

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



Закон смещения Вина (1893 г.)

$$\lambda_m \cdot T = b$$

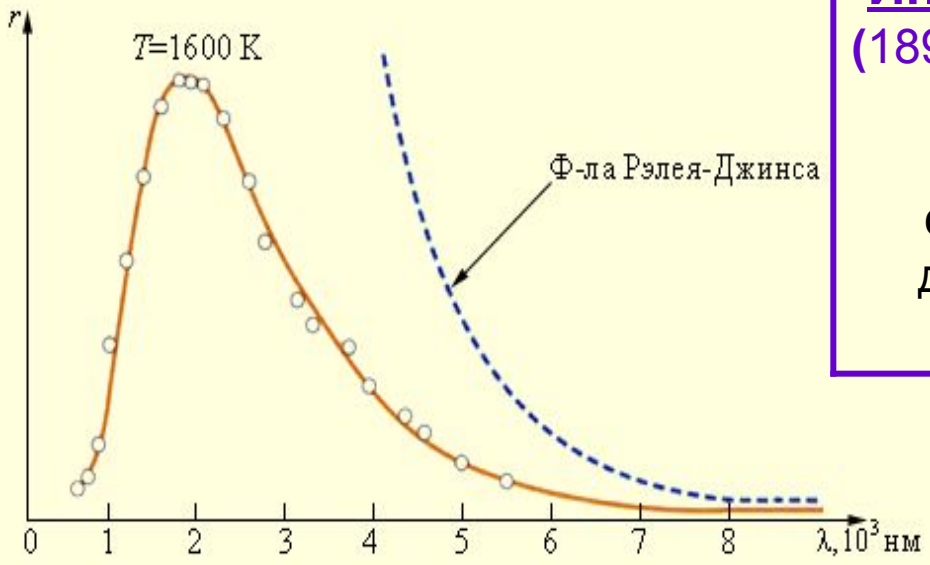
$b = 2{,}898 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянная Вина,

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 $\lambda \to 0$ $r^*_{\lambda,T} \to \infty$ – «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: $\varepsilon = n \cdot h \cdot \nu$ $(n = 1, 2, \ldots)$.

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

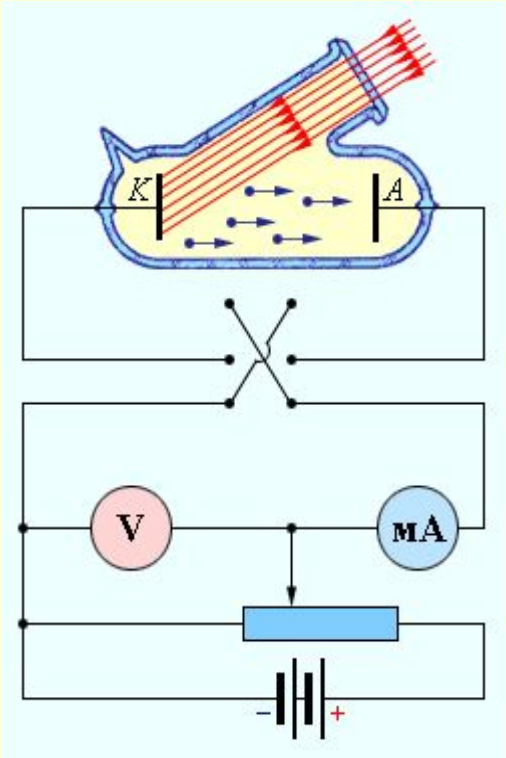
Определив δ экспериментально, нашли $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

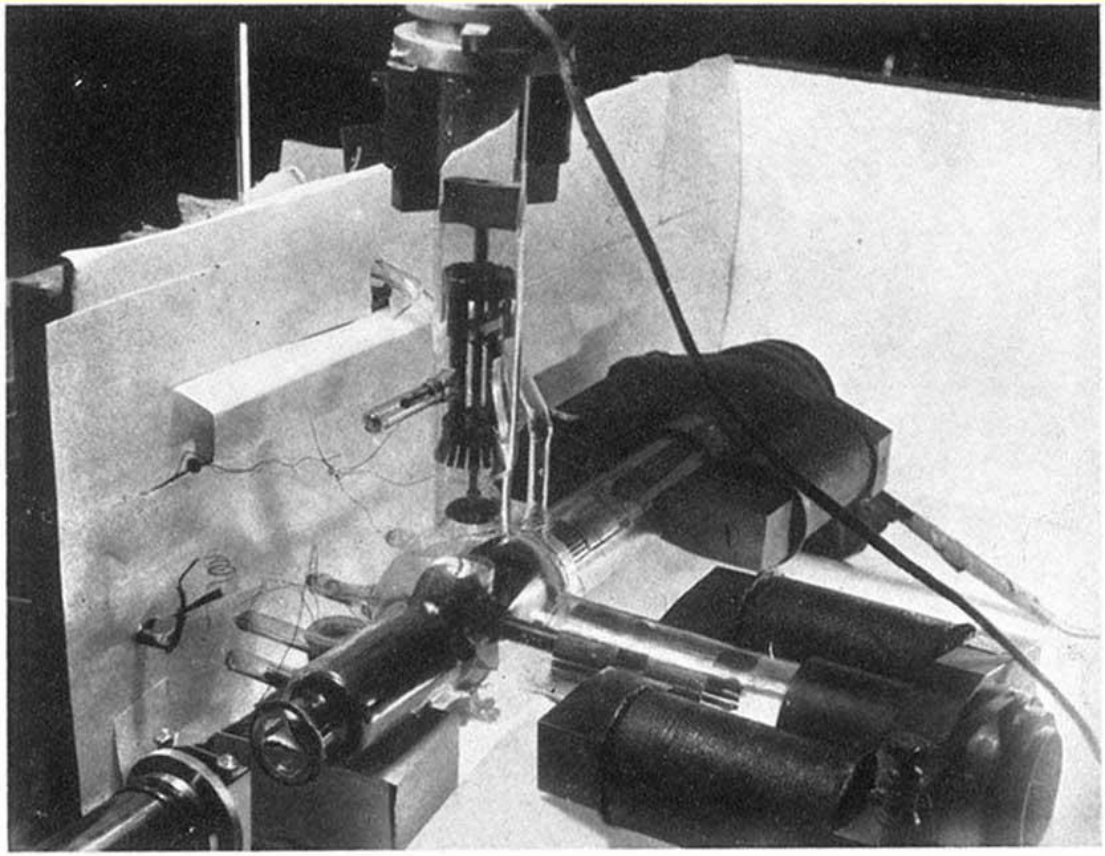
Г. Герц

Внешний фотоэффект

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

Экспериментальное изучение фотоэффекта

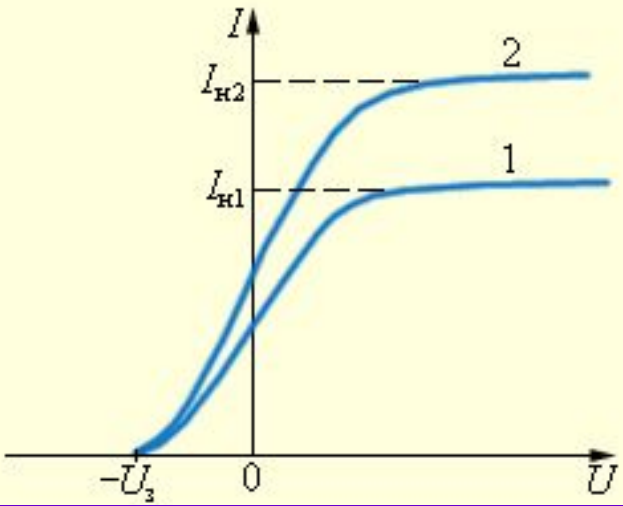




Фотография установки Р. Милликена (1916г.)

Законы внешнего фотоэффекта

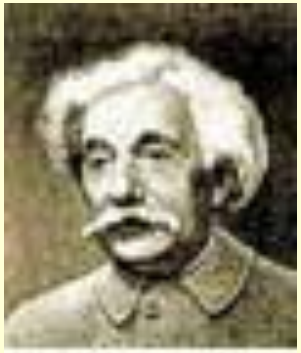
А.Г. Столетов



<u>Вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента.</u>
Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.

1. Фототок насыщения пропорционален световому потоку, падающему на металл $I_н \sim Ф$, 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.

$$h\nu = A_{вых} + m\upsilon^2/2$$

Первый закон фотоэффекта

$$\left.\begin{array}{l} \Phi \sim h\nu \cdot n_ф \\ n_э \sim n_ф \\ I \sim n_э \end{array}\right\} \Rightarrow I_н \sim \Phi$$

Второй закон фотоэффекта

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

Третий закон фотоэффекта

$$\left.\begin{array}{l} m\upsilon^2/2 = 0 \\ h\nu_0 = A_{вых} \end{array}\right\} \Rightarrow \nu_0 = A_{вых}/h$$

– красная граница фотоэффекта

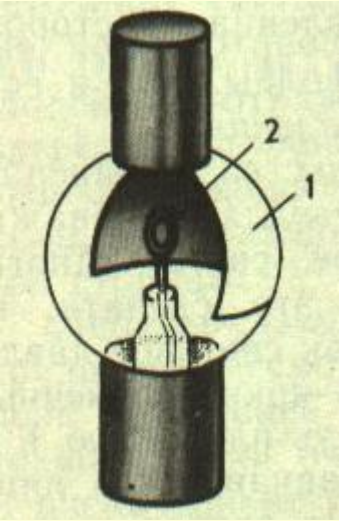
Электрон приобретает кинетическую энергию *не постепенно* (ускоряясь электрическим полем волны), а *сразу* – в результате единичного акта взаимодействия $\Rightarrow$ ***безинерционность*** фотоэффекта.

Применение фотоэффекта

фотоэлектронные приборы

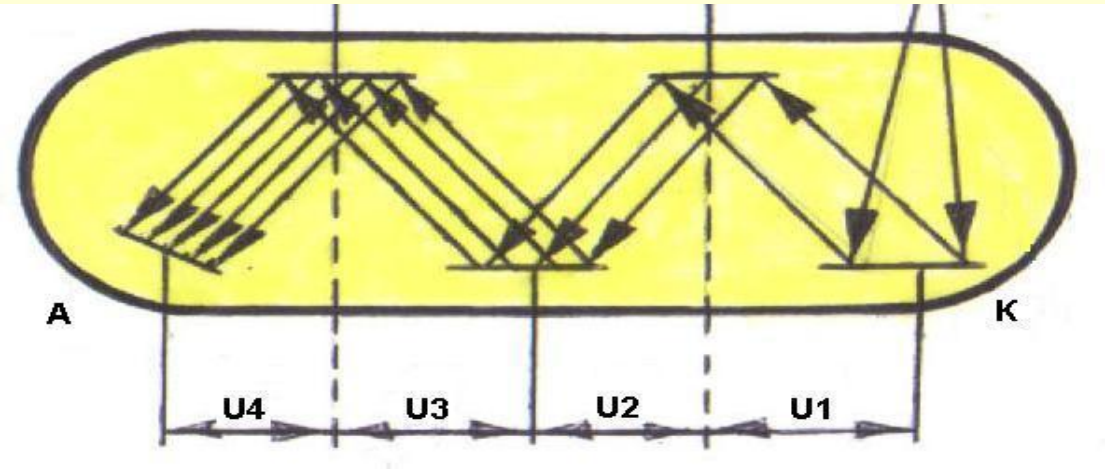
фотоэлементы

Преобразование светового сигнала в электрический



фотоумножители

Измерение очень малых световых потоков



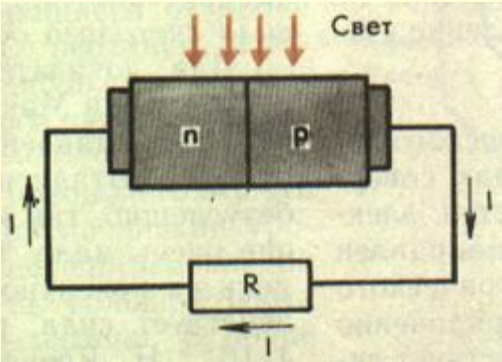
В астрономии, спектроскопии и т.д.

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 запрещеннной зоны.

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



Применение

В фотоэкспонометрах, 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 вентильный фотоэффект

Солнечные батареи на Международной космической станции

Квантово-оптические явления

Часть 2

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

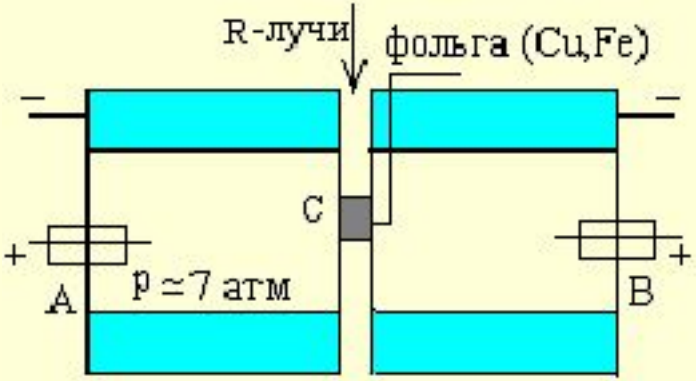
Развитие гипотезы световых квантов

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.)

A и B - индикаторы: счетчики Гейгера – Мюллера в свинцовом футляре;

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

Результаты: счетчики A и B 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

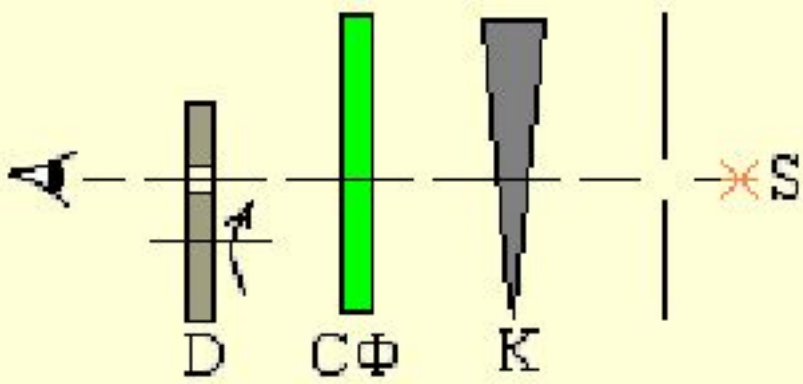
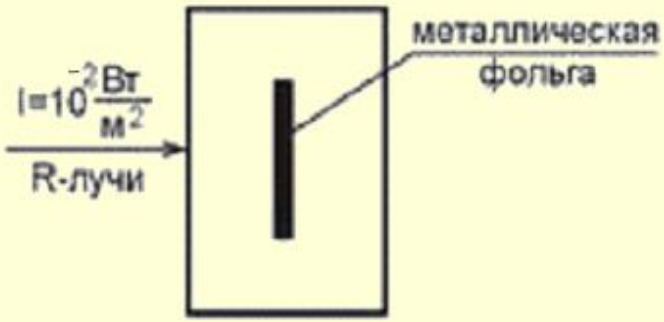


Схема опыта Вавилова С. И.:
D – диск вращающийся со счетчиком поворотов;
СФ – светофильтр ($\lambda \sim 0{,}5$ мкм);
К – клин из дымчатого стекла.
Длительность вспышки – $\tau \approx 0{,}1$с.

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 ~10^4 эВ.

Время накопления такой энергии атомами, рассчитанное из волновых представлений ~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: $\varepsilon = mc^2, \quad mc^2 = h\nu \;\rightarrow\; m_ф = h\nu/c^2$

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

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

Масса покоя фотона равна нулю!

4. Импульс фотона $$\mathbf{p}_ф = m_ф c = \frac{h\nu}{c^2} \cdot \quad = \frac{h\nu}{c}$$

Эффект Комптона

Эффект заключается в изменении длины волны λ рентгеновского излучения при его рассеянии.

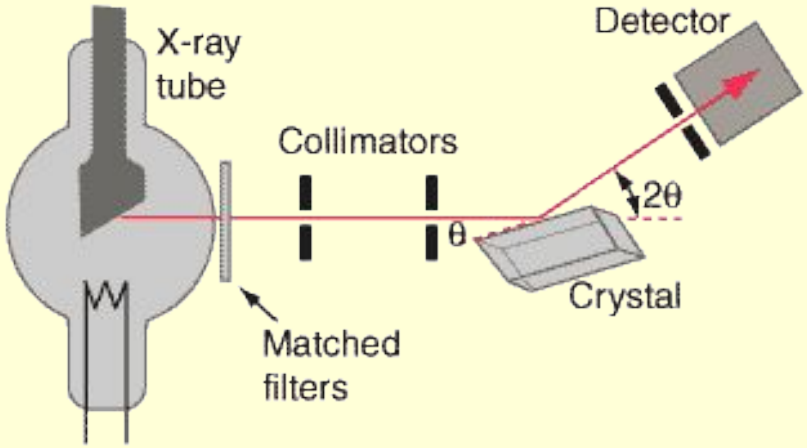


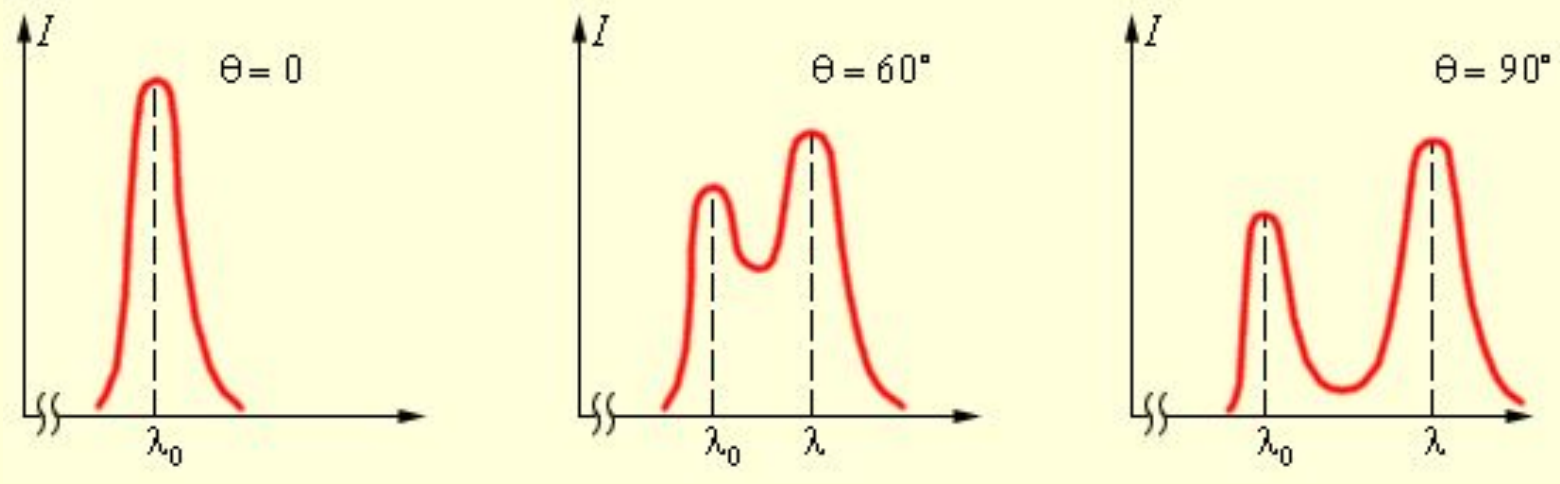
Рис.1 Рентгеновский спектрометр У.Г.Брэгга

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

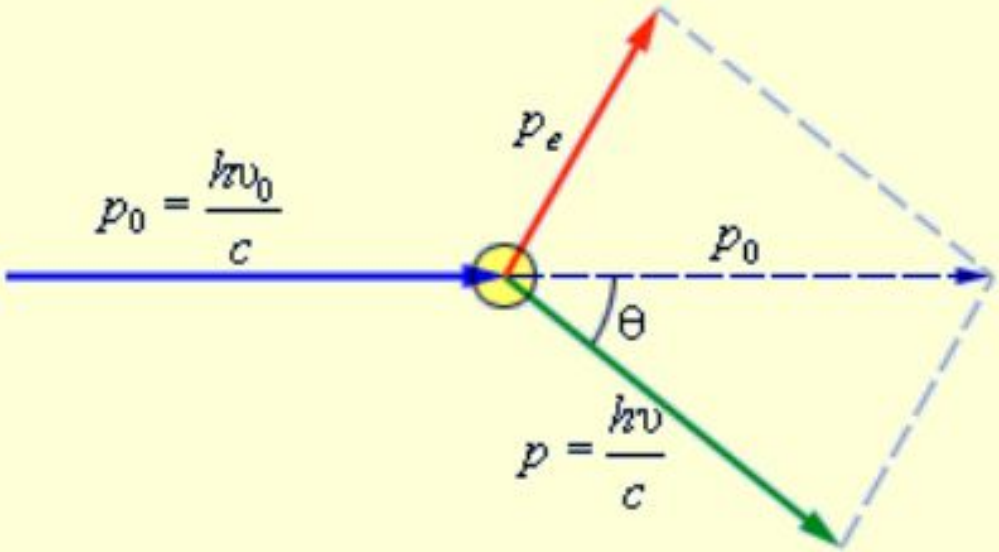


Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне.

Теория эффекта Комптона

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

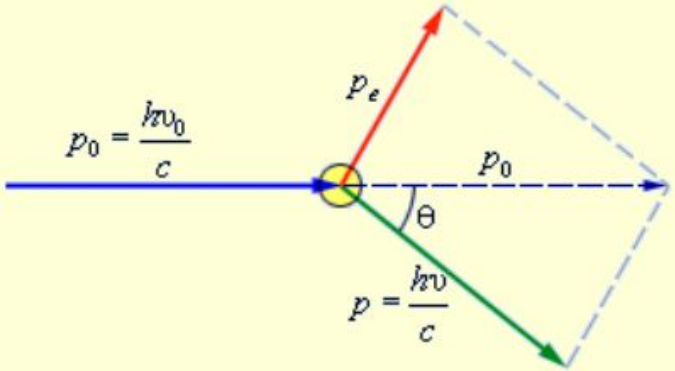
– по закону сохранения энергии, где m_0 и m – масса электрона до и после столкновения

$$\mathbf{P_ф = P_ф' + P_э}$$

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

– по закону сохранения импульса

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



$$\frac{h}{m_0c} = \lambda_к$$

– «комптоновская» длина волны, $\lambda_к = 0{,}024$ Å

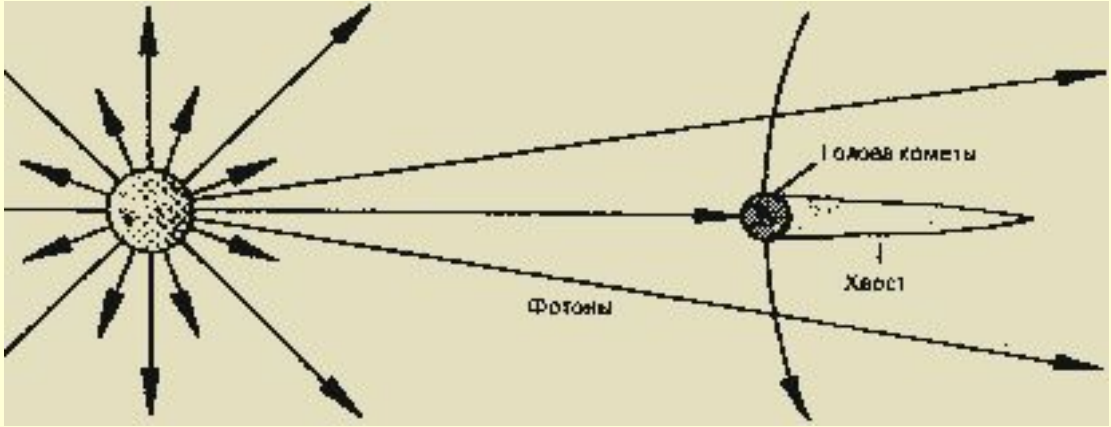
Формула Комптона

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

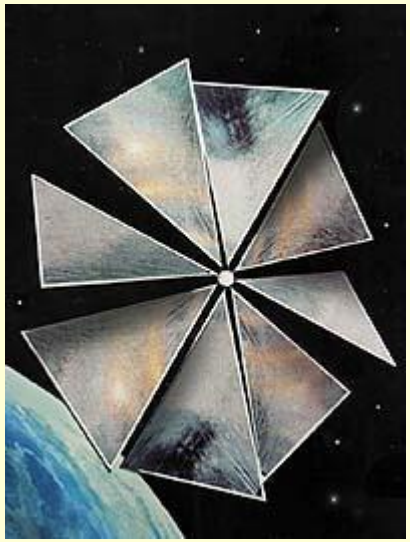
Наличие рассеянного излучения с длиной волны λ можно объяснить тем, что взаимодействуя с внутренними электронами (сильно связанными с атомом), фотон взаимодействует как бы с атомом в целом. Так как масса атома много больше массы фотона, то фотон отскакивает от него с той же энергией, а значит, без изменения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

Давление света

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

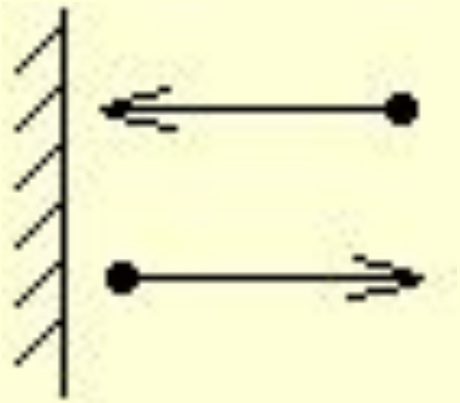


Давление света *направляет хвост кометы от Солнца*



Солнечный парус

Давление света



R – коэффициент отражения света или доля фотонов, соударяющихся со стенкой упруго; (1-R) – неупруго;
n – плотность фотонов;
(c·n) – количество фотонов, которое ударяется о единичную площадку в единицу времени;
W = hν·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

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

$$P = \frac{E_э}{c}(1 + R)$$

$W \cdot c = E_э$ – энергетическая освещенность поверхности

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

Давление света - опыт П.Н. Лебедева

(1899-1900 г.)

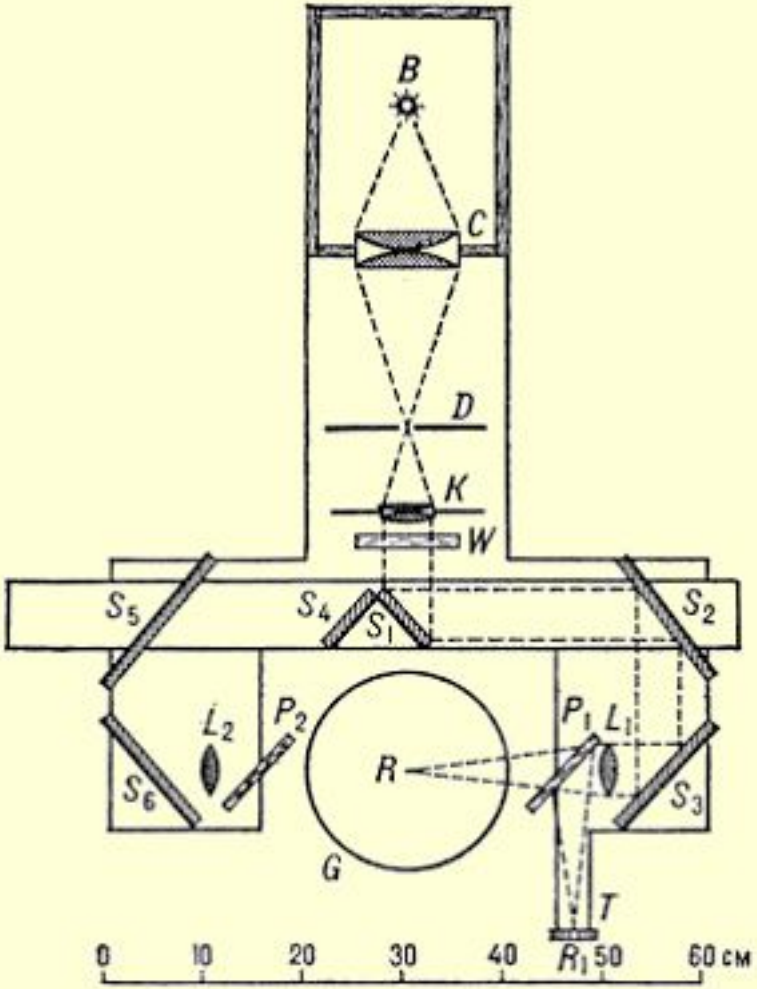
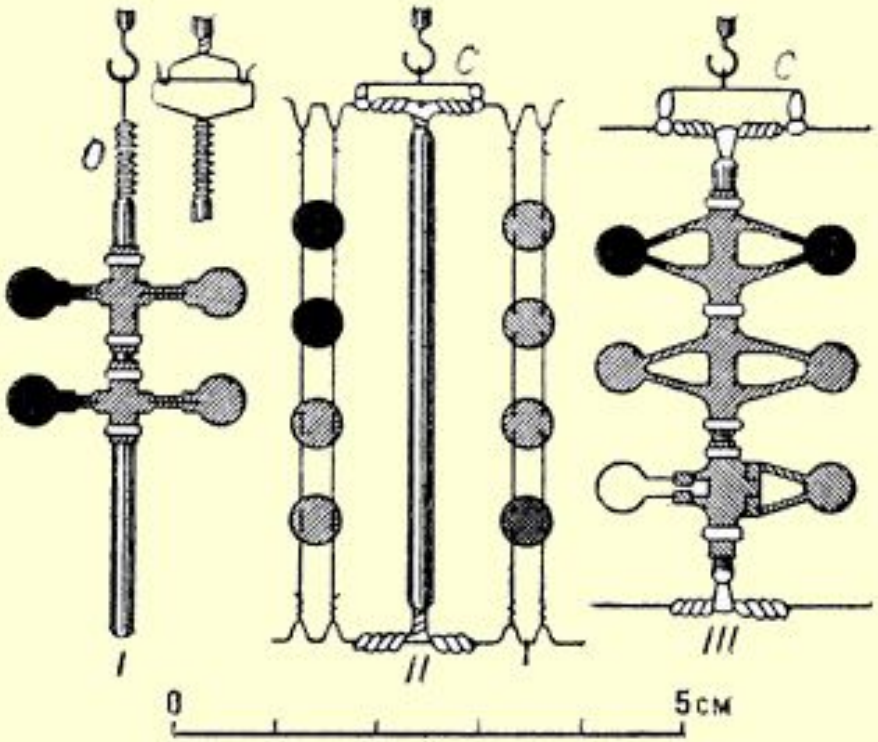


Схема опыта



Системы крылышек в опыте Лебедева

Люминесценция

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

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

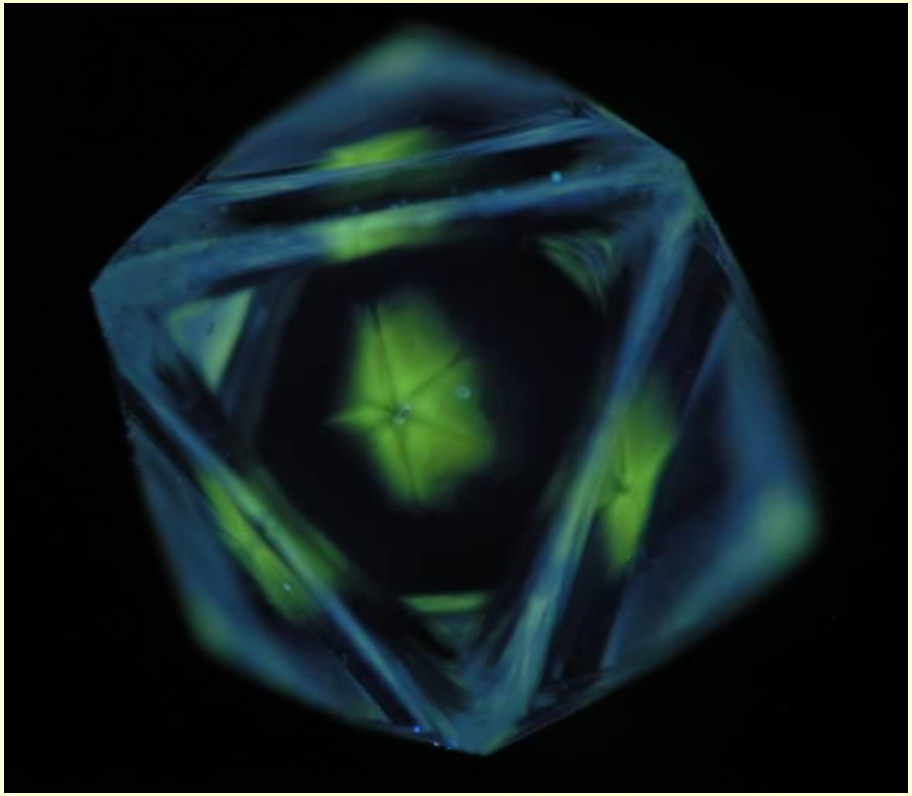
в газах и жидкостях

$\tau \approx 10^{-9} – 10^{-4}$ с.

Фосфоресценция

в твердых телах

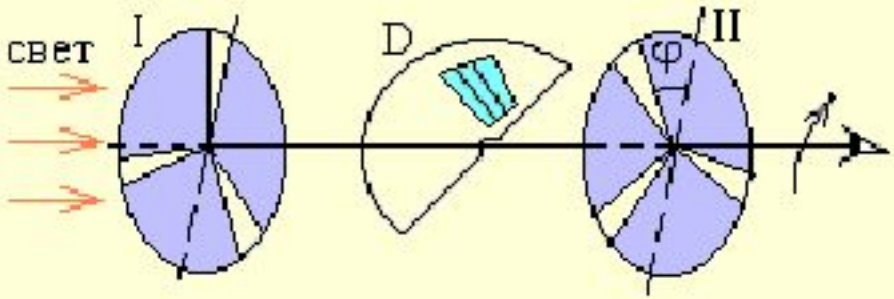
$\tau \approx 1 - 10^{6}$ с.



Фотолюминесценция алмаза

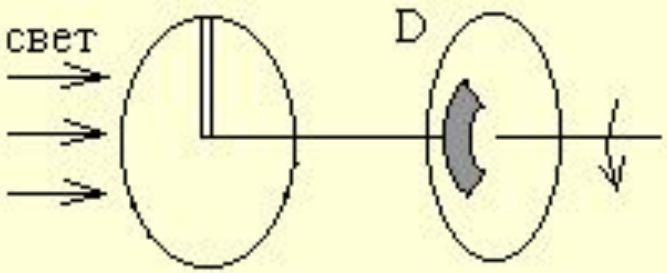
Методы исследования фотолюминесценции

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

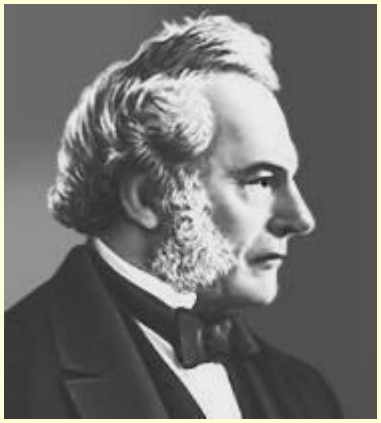
$$\Delta\varphi = \omega \cdot \tau$$

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

Закон затухания фотолюминесценции:

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

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 $\nu_л > \nu_0$ возникают при поглощении квантов $h\nu_0$ уже возбужденными атомами. Область спектра $(\nu_л - \nu_0) > 0$ называется *антистоксовой областью*.

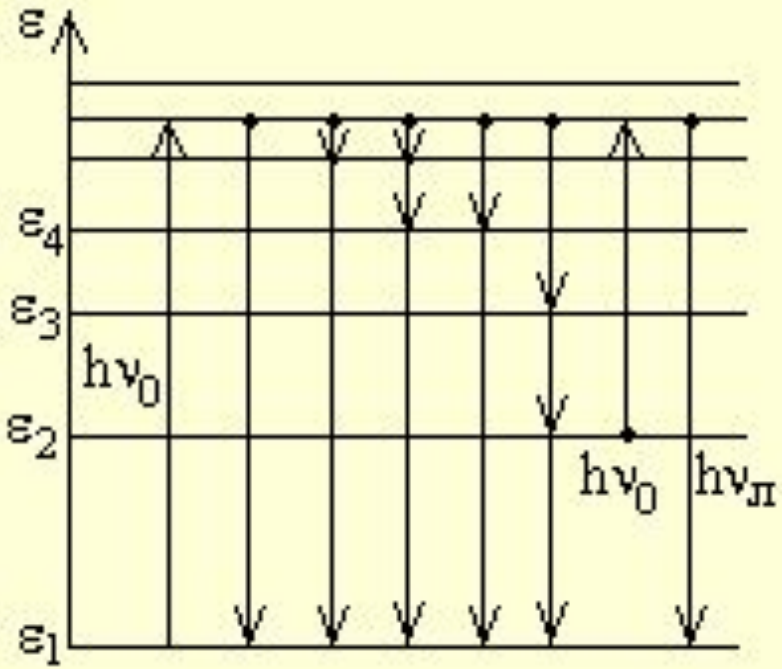
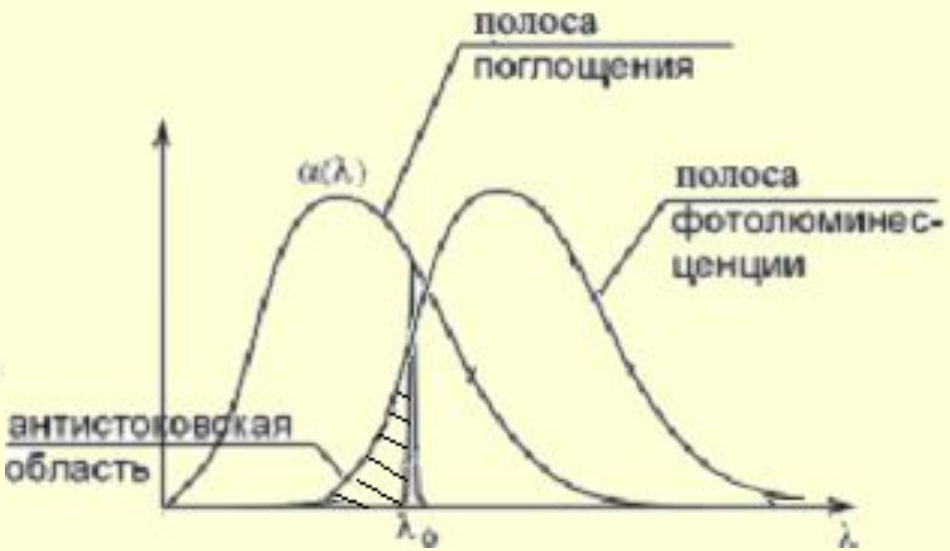


Диаграмма переходов

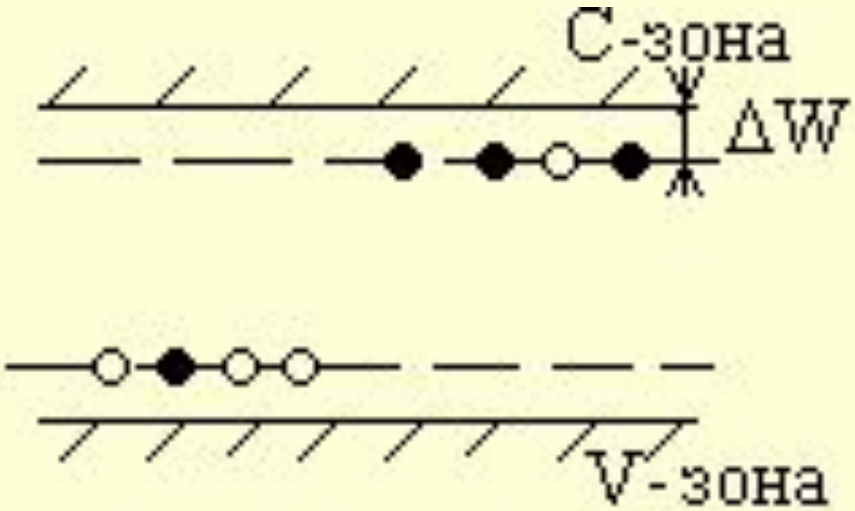


Особенности спектра фотолюминесценции

- 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^3; масса - $\Delta m = 10^{-10}$ г.
- В счетчиках элементарных частиц.

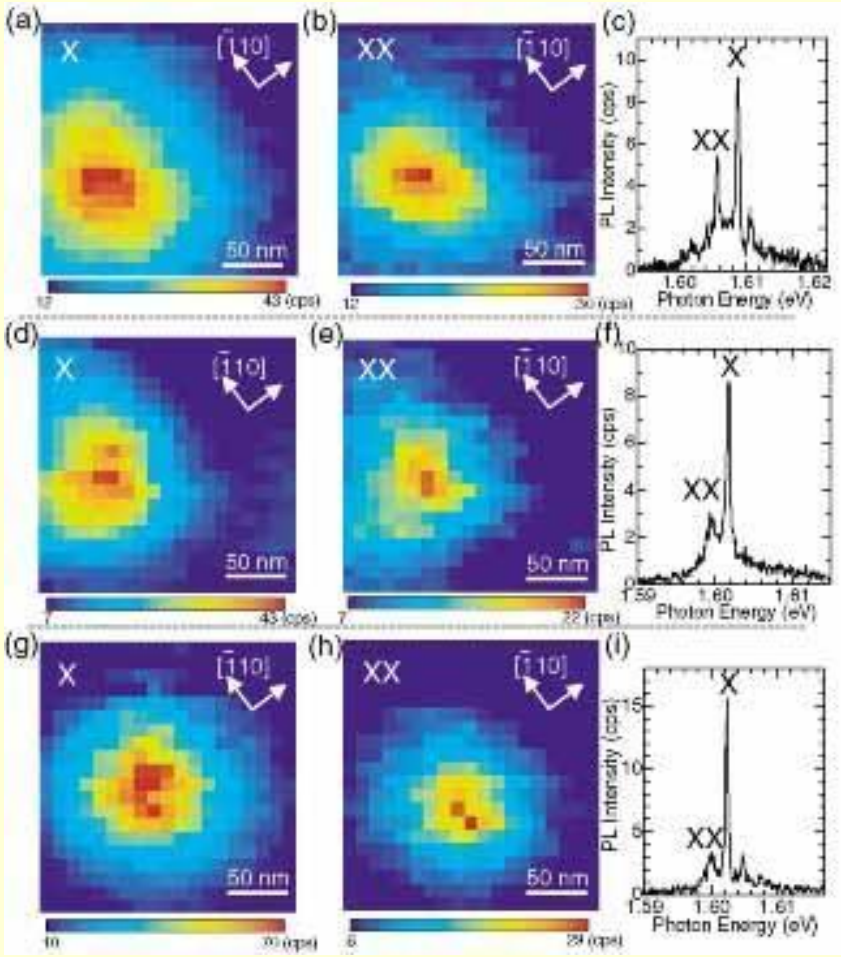
Применение люминесценции

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 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.