

КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ, ВИДЫ ОПТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Квантовая оптика – раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света.

Колебания электрических зарядов, входящих в состав вещества, обуславливают электромагнитное излучение, которое сопровождается потерей энергии веществом.

При *рассеянии* и *отражении* света формирование вторичных световых волн и продолжительность излучения веществом происходит за время, сравнимое с периодом световых колебаний.

Если излучение продолжается в течение времени, значительно превышающем период световых колебаний, то возможны **два типа** излучения:

- 1) **тепловое излучение**;
- 2) **люминесценция**.

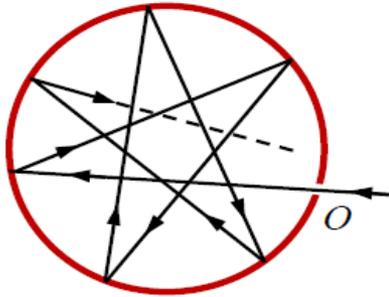
Равновесным состоянием системы тело–излучение является состояние, при котором распределение энергии между телом и излучением остаётся неизменным для каждой длины волны. Единственным видом излучения, которое может находиться в равновесии с излучающим телом, является **тепловое излучение** – свечение тел, обусловленное нагреванием.

Люминесценцией называется неравновесное излучение, избыточное при данной температуре над тепловым излучением тела и имеющее длительность, большую периода световых колебаний.

Тепловое излучение совершается за счёт энергии теплового движения атомов и молекул вещества (*внутренней энергии*) и свойственно всем телам при температурах выше 0 К. **Тепловое излучение** **равновесно** – тело в единицу времени поглощает столько же энергии, сколько и излучает.

АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО. ЗАКОН КИРХГОФА

Тело, способное поглощать при любой температуре всё падающее на него излучение любой частоты, называется **абсолютно чёрным телом**.



Спектральная поглощательная способность чёрного тела для всех частот и температур *тождественно равна единице*: $A_{\nu,T}^{\text{ч}} \equiv 1$. Абсолютно чёрных тел в природе нет,

однако такие тела, как сажа и чёрный бархат в определённом интервале частот близки к ним. Идеальной моделью чёрного тела является замкнутая полость с небольшим отверстием O , внутренняя

поверхность которой зачернена. Луч, попавший внутрь такой полости, полностью поглощается.

Наряду с понятием *чёрного тела* используют понятие **серого тела** – тела, поглощательная способность которого меньше единицы, *но одинакова для всех частот* и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела:

$$A_{\nu,T}^{\text{с}} = A_T = \text{const} < 1.$$

Закон Кирхгофа определяет соотношение между испускательной и поглощательной способностями тел.

Отношение испускательной и поглощательной способностей тела не зависит от природы тела и является универсальной для всех тел **функцией частоты и температуры** $r_{\nu,T}$.

$$\left| \frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T} \right.$$

Для чёрного тела $A_{\nu,T}^{\text{ч}} \equiv 1$, поэтому **универсальная функция Кирхгофа** $r_{\nu,T}$ есть спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) чёрного тела. Нахождение явной зависимости $r_{\nu,T}$ от частоты и температуры является важной задачей теории теплового излучения.

ЗАКОН СМЕЩЕНИЯ ВИНА. ФОРМУЛЫ РЭЛЕЯ-ДЖИНСА И ВИНА

Закон Стефана-Больцмана ничего не говорит о спектральном составе излучения чёрного тела. Положение максимума в спектре его излучения описывается экспериментальным **законом смещения Вина**:

Длина волны λ_{\max} , при которой излучательная способность $r_{\lambda,T}$ чёрного тела максимальна, обратно пропорциональна его термодинамической температуре

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

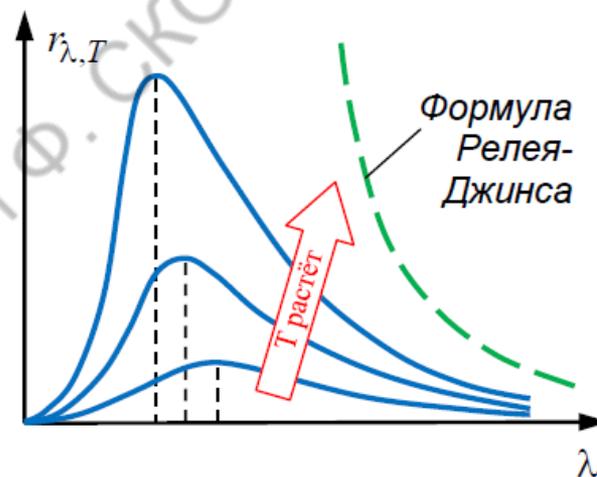
где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К – **постоянная Вина**.

Формулы Рэля-Джинса и Вина

Применяя к тепловому излучению классический закон *равнораспределения* энергии по степеням свободы, Рэлей и Джинс получили выражение для зависимости испускательной способности чёрного тела $r_{\nu,T}$ от частоты света:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

где $\langle \varepsilon \rangle = kT$ – средняя энергия осциллятора с собственной частотой ν .



КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА

Макс Планк *предположил*, что теория классического гармонического осциллятора неприменима к атомным осцилляторам; *атомные осцилляторы* излучают энергию *не непрерывно*, а определёнными *порциями* – *квантами*.

Энергия кванта:
$$\varepsilon_0 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \hbar\omega,$$

где $h = 2\pi\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – **постоянная Планка**.

В механике есть имеющая размерность "энергия×время" величина, которая называется *действием*. Поэтому постоянную Планка иногда называют *квантом действия*. Размерность h совпадает с размерностью момента импульса.

Поскольку энергия излучается порциями, то *энергия осциллятора* может принимать лишь определённые *дискретные* значения, кратные целому числу квантов:

$$\varepsilon = nh\nu \quad (n = 1, 2, \dots).$$

ФОТОЭФФЕКТ (1)

Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется высвобождение электронов под действием электромагнитного излучения.

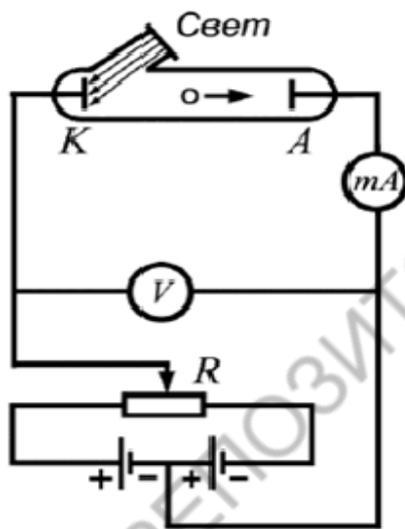
Различают фотоэффект *внутренний, вентильный и внешний*.

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением *переходы электронов внутри* полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные *без вылета наружу*. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению **фотопроводимости** – повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении.

Вентильный фотоэффект (разновидность внутреннего фотоэффекта) – возникновение ЭДС (**фото-ЭДС**) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект используется в солнечных батареях для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

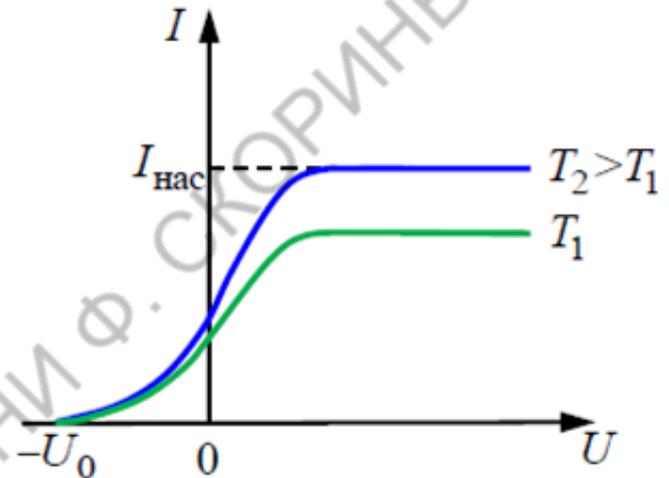
Схема для исследования внешнего фотоэффекта. Два электрода (катод K из исследуемого металла и анод A) в вакуумной трубке подключены к батарее так, что можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на них напряжения. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом (через кварцевое окошко) измеряется включённым в цепь миллиамперметром. Зависимость фототока I , образуемого потоком электронов, испускаемых катодом под действием света, от напряжения U между катодом и анодом называется **вольт-амперной характеристикой**



кой фотоэффекта.

ФОТОЭФФЕКТ (2)

По мере увеличения U фототок постепенно возрастает пока не выходит на насыщение. Максимальное значение тока $I_{\text{нас}}$ – фототок насыщения – определяется таким значением U , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода: $I_{\text{нас}} = en$, где n – число электронов, испускаемых катодом в 1 с. При $U = 0$ фототок не



исчезает, поскольку фотоэлектроны при вылете из катода обладают некоторой начальной скоростью. Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение** U_0 .

При $U = U_0$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете максимальной начальной скоростью, не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода: $K_{\text{max}} = mv_{\text{max}}^2/2 = eU_0$, т. е., измерив задерживающее напряжение U_0 , можно определить максимальное значение скорости v_{max} и кинетической энергии K_{max} фотоэлектронов.

ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА (1)

- (1) **Закон Столетова:** при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, испускаемых фотокатодом в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещённости E_e катода).
- (2) Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .
- (3) Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта** – минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Для объяснения *механизма фотоэффекта Эйнштейн предположил*, что свет частотой ν не только **испускается** отдельными квантами (согласно гипотезе Планка), но и **распространяется** в пространстве и **поглощается** веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $\varepsilon_0 = h\nu$.

Кванты электромагнитного излучения, движущиеся со скоростью c распространения света в вакууме, называются **фотонами**.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном **работы выхода** A из металла (см. стр. 3–31) и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии.

ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА (2)

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

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

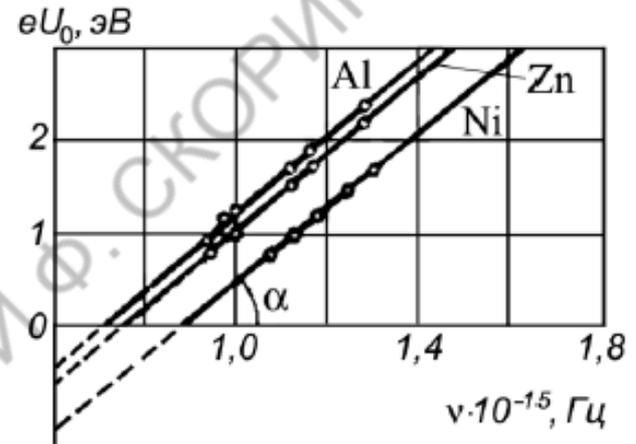
Это уравнение объясняет зависимость кинетической энергии фотоэлектронов от частоты падающего света (2-й закон).

Предельная частота $\nu_0 = \frac{A}{h}$ (или $\lambda_0 = \frac{hc}{A}$), при

которой кинетическая энергия фотоэлектронов становится равной нулю, и есть красная граница фотоэффекта (3-й закон).

Другая форма записи уравнения Эйнштейна: $eU_0 = h(\nu - \nu_0)$.

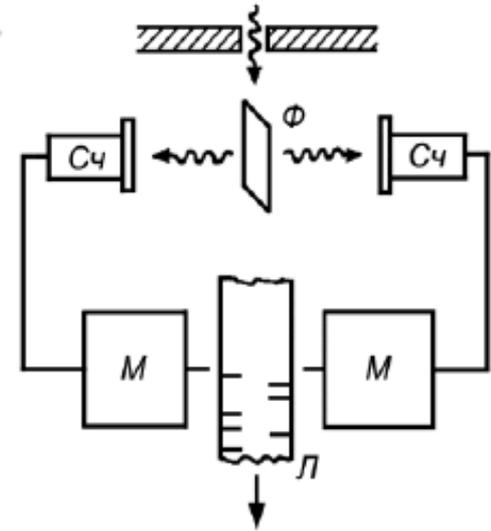
На рисунке изображена зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты облучающего света для алюминия, цинка и никеля. Все прямые параллельны друг другу, причём производная $d(eU_0)/d\nu$ не зависит от материала катода и численно равна постоянной Планка h . Отрезки, отсекаемые на оси ординат, численно равны работе A выхода электронов из соответствующих металлов.



ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА (3)

На явлении фотоэффекта основано действие фотоэлементов и фотосопротивлений (фоторезисторов) в фотоз экспонометрах, люксметрах и устройствах управления и автоматизации различных процессов, пультах дистанционного управления, а также полупроводниковых фотоэлектронных умножителей и солнечных батарей.

Существование фотонов было продемонстрировано в *опыте Боте*. Тонкая металлическая фольга Φ , расположенная между двумя счётчиками $Cч$, под действием жёсткого облучения испускала рентгеновские лучи. Если бы излучаемая энергия распространялась равномерно во все стороны, как это следует из волновых представлений, то оба счётчика должны были бы срабатывать одновременно, и на движущейся ленте L появлялись бы синхронные отметки маркерами M . В действительности же расположение отметок было беспорядочным. Следовательно, в отдельных актах испускания рождаются световые частицы (фотоны), летящие то в одном, то в другом направлении.



ЕДИНСТВО КОРПУСКУЛЯРНЫХ И ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ СВЕТА. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА (1)

Используя соотношения $E^2 = m_0^2 c^4 + p_\gamma^2 c^2$, $\varepsilon_0 = m_\gamma c^2$, $m_0 = 0$, получаем выражения для **энергии**, **массы** и **импульса** фотона:

$$\varepsilon_0 = h\nu, \quad m_\gamma = \frac{h\nu}{c^2}, \quad p_\gamma = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Эти соотношения связывают квантовые (**корпускулярные**) характеристики фотона – массу, импульс и энергию – с **волновой** характеристикой света – его частотой.

Свет обладает **одновременно волновыми** свойствами, которые проявляются в закономерностях его распространения, интерференции, дифракции, поляризации, и **корпускулярными**, которые проявляются в процессах взаимодействия света с веществом (испускания, поглощения, рассеяния).

Давление света

Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление.

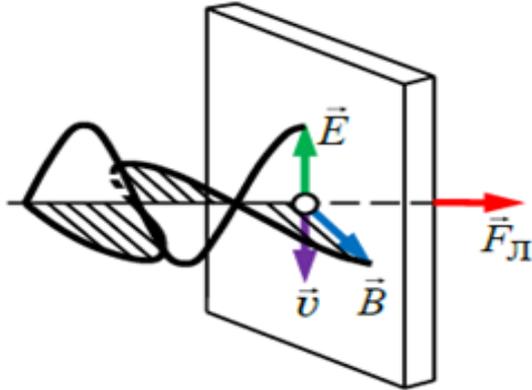
Пусть поток монохроматического излучения частоты ν падает перпендикулярно поверхности. Если за 1 с на 1 м^2 поверхности тела падает N фотонов, то при коэффициенте отражения ρ света от поверхности тела отразится ρN фотонов, а $(1 - \rho)N$ фотонов – поглотится. Каждый поглощённый фотон передаёт поверхности импульс p_γ , а каждый отражённый фотон – $2p_\gamma$.

Давление света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности за 1 с N фотонов:

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

Энергетическая освещённость поверхности $Nh\nu = E_e$ (энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени). **Объёмная плотность энергии излучения:** $w = \frac{E_e}{c}$. Отсюда: $p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho) = w(1 + \rho)$.

ЕДИНСТВО КОРПУСКУЛЯРНЫХ И ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ СВЕТА. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА (2)

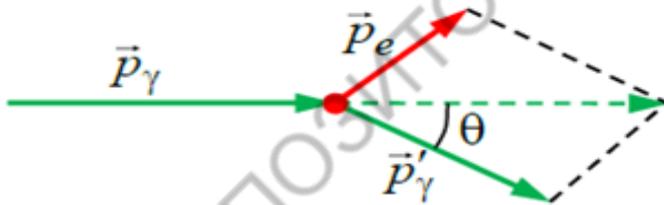


Волновая теория света на основании уравнений Максвелла приходит к такому же выражению. Давление света в волновой теории объясняется тем, что под действием электрического поля \vec{E} электромагнитной волны электроны в металле будут двигаться в направлении (обозначенном \vec{v} на рисунке) противоположном \vec{E} . Магнитное поле \vec{B} электромагнитной волны действует на движущиеся электроны с силой Лоренца в направлении (по правилу левой руки)

перпендикулярном поверхности металла. Таким образом, электромагнитная волна оказывает на поверхность металла давление.

Эффект Комптона

Корпускулярные свойства света отчётливо проявляются в **эффекте Комптона** – упругом рассеянии коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны. Это увеличение $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не зависит от длины волны λ падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния θ :



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где λ' – длина волны рассеянного излучения, λ_C – **комптоновская длина**

волны. При рассеянии на электроне:

$$\lambda_C^e = \frac{h}{m_e c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

ЭФФЕКТ КОМПТОНА (2)

Фотон (с энергией $\varepsilon_\gamma = h\nu$ и импульсом $p_\gamma = h\nu/c$), столкнувшись с электроном (энергия покоя $W_0 = m_e c^2$, m_e – масса покоя электрона), передаёт ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается). В процессе этого **упругого** столкновения выполняются законы сохранения энергии $W_0 + \varepsilon_\gamma = W + \varepsilon'_\gamma$ и импульса $\vec{p}_\gamma = \vec{p}_e + \vec{p}'_\gamma$, где $W = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4}$ – релятивистская энергия электрона после столкновения,

Таким образом: $m_e c^2 + h\nu = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4} + h\nu'$,
 $p_e^2 = p_\gamma^2 + p_\gamma'^2 - 2 p_\gamma p_\gamma' \cos\theta = (h\nu/c)^2 + (h\nu'/c)^2 - 2(h^2/c^2) \cos\theta$. Следовательно,
но, $m_e c^2 (\nu - \nu') = h\nu\nu' \cos\theta$. С учётом $\nu = c/\lambda$, получим $\Delta\lambda = 2\lambda_C \sin^2(\theta/2)$.

Эффект Комптона *не может наблюдаться в видимой области спектра*, поскольку энергия фотона видимого света сравнима с энергией связи электрона с атомом, при этом даже внешний электрон атома нельзя считать свободным.

*Эффект Комптона, излучение чёрного тела и фотоэффект служат доказательством **квантовых** (корпускулярных) представлений о свете как о потоке фотонов.*