# Глава 6. Квантовая природа излучения. § 6.1. Тепловое излучение.

Кеантовая оптика — раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света.

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

**ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** – излучение вызванное нагреванием тел. Совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул (внутренней энергии), характерно для всех тел при Т>0 К.

**Тепловое излучение** – равновесный процесс, т. е. тело в единицу времени поглощает столько же энергии, сколько и излучает.

Количественной характеристикой теплового излучения служит спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) тела  $R_{v,T}$  — мощность  $R_{v,T} = \frac{dW_v^{\rm E}}{dt}$  излучения с единицы площади поверхности тела в интер-

c

# Энергетическая светимость:

$$R_T = \int_0^\infty R_{v,T} dv$$

вале частот единичной ширины.

т.к.  $\lambda = \frac{c}{v}$ , то  $R_{v,T} = R_{\lambda,T} \frac{d\lambda}{dv} = R_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{c}$ 

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется спектральной поглощательной 
$$A_{
u,T}=rac{dV}{dV}$$

**слособностью**  $A_{v,T}$ , показывающей, какая доля энергии  $dW_{v,v+dv}$   $dW_{v,v+dv}$ , приносимой за единицу времени на единицу площади тела падающими на нее электромагнитными волнами с частотами от v до v+dv, поглощается телом.

Тело, способное поглощать при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты называется абсолютно черным телом (АЧТ).

$$A_{\nu,T}^{\,\mathbf{q}} \equiv 1$$
 Модель АЧТ



Наряду с понятием черного 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:

$$A_{v,T} = A_T = const < 1$$

## § 6.2. Закон Кирхгофа.

Отношение испускательной и поглощательной способностей тела не зависит от природы тела и является универсальной для всех тел функцией частоты и температуры  $f_{v,T}$ 

# Закон Кирхгофа

 $\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$ 

Для черного тела  $A_{v,T}^{^{\mathrm{u}}}\equiv 1$ , поэтому **универсальная функция Кирх- гофа**  $r_{v,T}$  есть спектральная плотность энергетической светимости (*испуска*-

тельная способность) черного тела.

$$r_{v,T} = R_{v,T}$$

# § 6.3. Закон Стефана-Больцмана. Закон смещения Вина.

Энергетическая светимость серого тела (интегральная по  $oldsymbol{v}$  ):

$$R_T^{\rm c} = \int\limits_0^\infty A_{v,T} r_{v,T} dv = A_T \int\limits_0^\infty r_{v,T} dv = A_T R_e$$
 где  $R_e = \int\limits_0^\infty r_{v,T} dv$  —

энергетическая светимость черного тела, которая зависит только температуры. Эту зависимость описывает экспериментальный закон Стефана-**Больцмана**: энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры:

$$R_e = \sigma T^4$$
 (следовательно  $R_T^c = A_T \sigma T^4$ )

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \, \mathrm{Bt/(m^2 \cdot K^4)}$  — постоянная Стефана-Больцмана.

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

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

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

где  $b = 2.9 \cdot 10^{-3}$  м·К — постоянная Вина.

# § 6.4. ФОРМУЛА Рэлея-Джинса.

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

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

где  $\langle oldsymbol{arepsilon} 
angle = kT$  — средняя энергия осциллятора с собственной частотой v

Однако попытка получить закон Стефана-Больцмана из этой формулы приводит к **абсурдному** результату —  $R_e$  неограниченно растет, достигая чрезвычайно больших значений в ультрафиолете, — который получил название **"ультрафиолетовая катастрофа"**:

$$R_e = \int_0^\infty r_{v,T} dv = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^\infty v^2 dv = \infty$$

# § 6.5. ФОРМУЛА ПЛАНКА.

<u>Гипотеза М. Планка:</u> Излучение энергии происходит не непрерывно, а определенными порциями – *квантами*.

Энергия кванта:

$$\varepsilon_0 = h v = h \frac{c}{\lambda} = \hbar \omega$$

где  $h = 2\pi\hbar = 6,626\cdot 10^{-34}\,{\rm Дж\cdot c}$  — постоянная Планка

Поскольку энергия излучается порциями, то энергия осциллятора может принимать лишь <u>определенные</u> дискретные значения, кратные целому числу квантов:  $\varepsilon = nhv$   $(n=1,2,\ldots)$ 

Вероятность того, что энергия колебания осциллятора равна  $\varepsilon_{_{i}}$ 

$$p_i = \frac{N_i}{N} = \frac{\exp(-\varepsilon_i/kT)}{\sum_i \exp(-\varepsilon_i/kT)}$$

Средняя энергия осцилляторов равна

#### ФОРМУЛА ПЛАНКА:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\varepsilon_0}{\exp\left(\frac{\varepsilon_0}{kT}\right) - 1}$$

$$r_{v,T} = \frac{2\pi h v^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{hv}{kT}\right) - 1}$$

$$r_{v,T} = \frac{1}{c^2} \exp\left(\frac{hv}{kT}\right) - 1$$
  $r_{\lambda,T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}$  (учитывая  $c = \lambda v$  ,  $r_{\lambda,T} = r_{v,T} \, c/\lambda^2$  )

Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости от температуры:

$$r_{\lambda,T}$$
 =  $cT^5$   $C - постоянная,  $c=1,3\cdot 10^{-5}$  Вт/  $m^3 \cdot K^5$$ 

Таким образом формула Планка обобщает все законы теплового излучения и является полным решением основной задачи теории теплового излучения.

# § 6.6. Оптическая пирометрия.

Оптическая пирометрия — методы измерения высоких температур, использующие зависимость спектральной плотности энергетической светимости тел от температуры.

Приборы, служащие для измерения температуры, нагретых тел по интенсивности их теплового излучения в оптическом диапазоне спектра называются *пирометрами*.

Различают три температуры :

радиационную, цветовую, яркостную

**Радиационная Т** $_{\text{рад}}$  — температура АЧТ, при которой его энергетическая светимость  $\mathbf{R}_{\mathbf{e}}$  равна энергетической светимости  $\mathbf{R}_{\mathbf{T}}$  исследуемого тела.

$$T_{paд} = T_4 \overline{A_T}$$

$$T_{paд} = T_4/A_T$$
 т.к.  $A_T < 1$  то  $T_{paд} < T_{uct}$ 

**Цветовая** Т<sub>ив</sub> – температура черного тела, при которой отношение спектральных энергетических яркостей двух заданных длин волн одинаково с исследуемым телом.

$$T_{IIB} = \frac{b}{\lambda_{max}}$$

$$T_{\text{цв}} = T_{\text{ист}}$$

**Яркостная Т**<sub>яр</sub> – температура черного тела, при которой его спектральная энергетическая яркость равна спектральной энергетической яркости исследуемого излучения при той же длине волны.

$$r_{\lambda,T_{sp}} = R_{\lambda,T}$$

т.к. 
$$A_T < 1$$
 то  $T_{gp} < T_{gp}$ 

# **Глава 7. ФОТОНЫ. § 7.1.** Фотоэффект

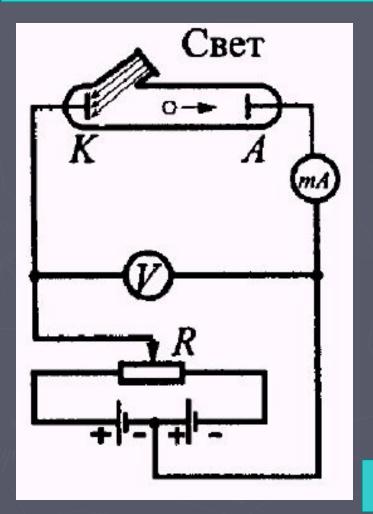
Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется высвобождение электронов под действием электромагнитного излучения. Различают фотоэффект внутренний, вентильный и внешний.

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.

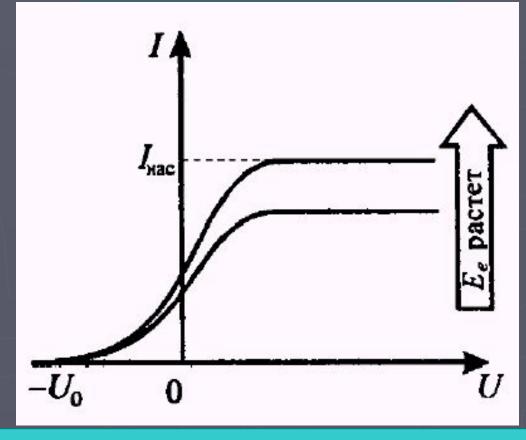
Вентильный фотоэффект (разновидность внутреннего фотоэффекта) — возникновение ЭДС (фото-ЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект используется в солнечных батареях для прямого преобразования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

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

#### Схема А.Г. Столетова



### **Вольтамперная характеристика**



U<sub>0</sub> - задерживающее напряжение

# Законы фотоэффекта



- I) <u>Закон Столетова</u>: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, испускаемых фотокатодом в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности  $E_{\nu}$  катода).
- $\mathbf{H}$ ) Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой V.
- III) Для каждого вещества существует *красная граница фотоэффекта* минимальная частота  $V_0$  света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

# § 7.2. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном **работы выхода** A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии:

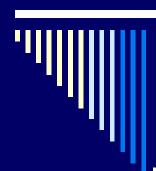
$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{мак}}^2}{2}$$

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A_{BHX} + eU_3$$

### Красная граница фотоэффекта:

$$v_{\kappa p} = v_{\min} = \frac{A_{\text{BMX}}}{h}$$

$$\lambda_{\kappa p} = \lambda_{\max} = \frac{hc}{A_{\text{BMX}}}$$



### § 7.3. ФОТОНЫ. Давление света.

Энергия фотона 
$$\varepsilon_0 = hv = h\frac{c}{\lambda} = \hbar\omega$$

Масса фотона (находится из закона  $\varepsilon_0 = m_{\gamma}c^2$ ):  $m_{\gamma} = \frac{hV}{c^2}$ 

Импульс фотона (из теории относительности):  $p_{\gamma} = \frac{\mathcal{E}_0}{c} = \frac{\hbar v}{c}$ 

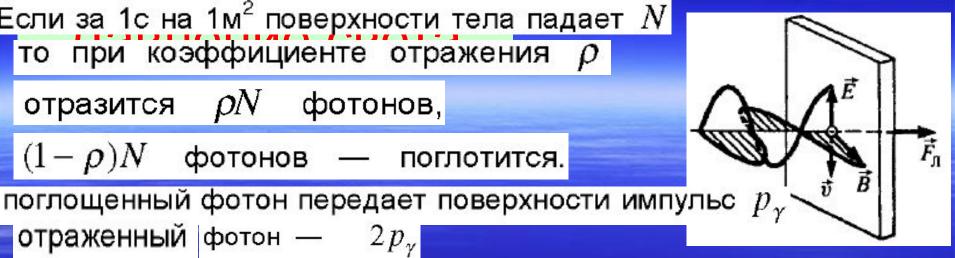
Эти соотношения связывают квантовые (*корпускулярные*) характеристики фотона — массу, импульс и энергию с волновой характеристикой света — его частотой.

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

Эффект Комптона, излучение черного тела фотоэффект служат доказательство**м** квантовых (корпускулярных) представлений о свете как потоке фотонов.

Если за 1с на 1м $^2$  поверхности тела падает  $\,N\,$ то при коэффициенте отражения hoотразится  $ho\!N$  фотонов,  $(1-\rho)N$  фотонов — поглотится.

отраженный фотон —  $2p_{\nu}$ 



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

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

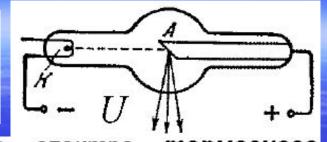
 $Nhv = E_e$  — энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени — **энергетическая освещенность поверхности**.

$$w\!=\!rac{E_e}{c}$$
 — объемная плотность энергии излучения.

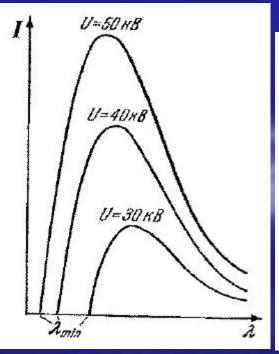
$$p = \frac{E_e}{c}(1+\rho) = w(1+\rho)$$

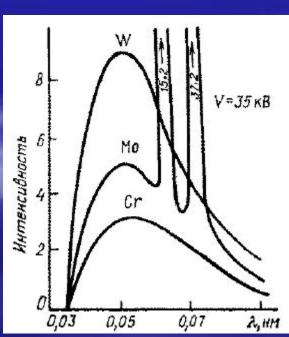
# § 7.4. Рентгеновские лучи.

рентгеновская трубка, в которой вылетающие с катода K электроны бомбардируют анод A (антикатод), изготовленный из тяжелых металлов  $(W, \mathrm{Cu}, \mathrm{Pt} \ \text{и} \ \mathrm{T.d.}).$ 



состоит из сплошного спектра **тормозного** излучения, возникающего при торможении электронов в аноде, и линейчатого спектра характеристического излучения, определяемого материалом анода.





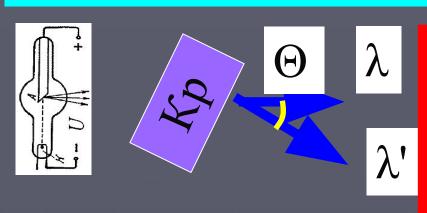
# Граница сплошного спектра – $\lambda_{min}$ :

$$E_{\max} = h v_{\max} = e U$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{v_{\max}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{eU} = \frac{ch}{E_{\max}}$$

### § 7.5. Эффект КОМПТОНА.



Это увеличение  $\Delta \lambda = \lambda' - \lambda$  не зависит от длины волны λ падающего излучения природы рассеиваювещества щего определяется только  $\lambda'$  — длина волны рассеянного излучения, углом рассеяния Θ:

Эффект Комптона – упругое рассеяние рентгеновского и у-излучения на свободных электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.

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

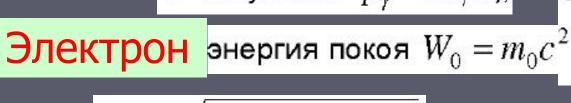
 $\hat{\lambda}_C$  — комптоновская длина волны.

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.

**ФОТОН** (с энергией  $\varepsilon_{\gamma} = hv$ 

и импульсом  $p_{\gamma} = h v/c$ ),

энергия покоя 
$$W_0=m_0c^2$$



$$W_0 + \varepsilon_{\gamma} = W + \varepsilon_{\gamma}'$$

 $W = \sqrt{p_e c^2 + m_0^2 c^4}$ 

релятивистская энергия электрона после столкновения,  $\vec{p}_{\gamma} = \vec{p}_e + \vec{p}_{\gamma}'$   $\epsilon_{\gamma}' = hv'$  — энергия рассеянного фотона.

$$m_0c^2 + hv = \sqrt{p_ec^2 + m_0^2c^4} + hv'$$

$$p_e^2 = p_{\gamma}^2 + p_{\gamma'}^2 - p_{\gamma} p_{\gamma}' \cos \theta = \left(\frac{h v}{c}\right)^2 + \left(\frac{h v'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2} v v' \cos \theta$$

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

$$m_0 c$$

$$h^2 \frac{\theta}{2}$$
  $\theta$  . С у Для электрона  $\lambda_C^e = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 0,0243 \text{ Å}.$