

# Квантовая оптика

1. Тепловое излучение
2. Фотоэффект
3. Эффект Комптона
4. Фотоны
5. Корпускулярно-волновой дуализм света

# Тепловое излучение

Все тела в той или иной степени излучают электромагнитные волны. Тела, нагретые до достаточно высоких температур, *светятся, а при обычных температурах являются источниками инфракрасного (ИК) излучения.*

**Тепловое излучение** – электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счёт его внутренней энергии.

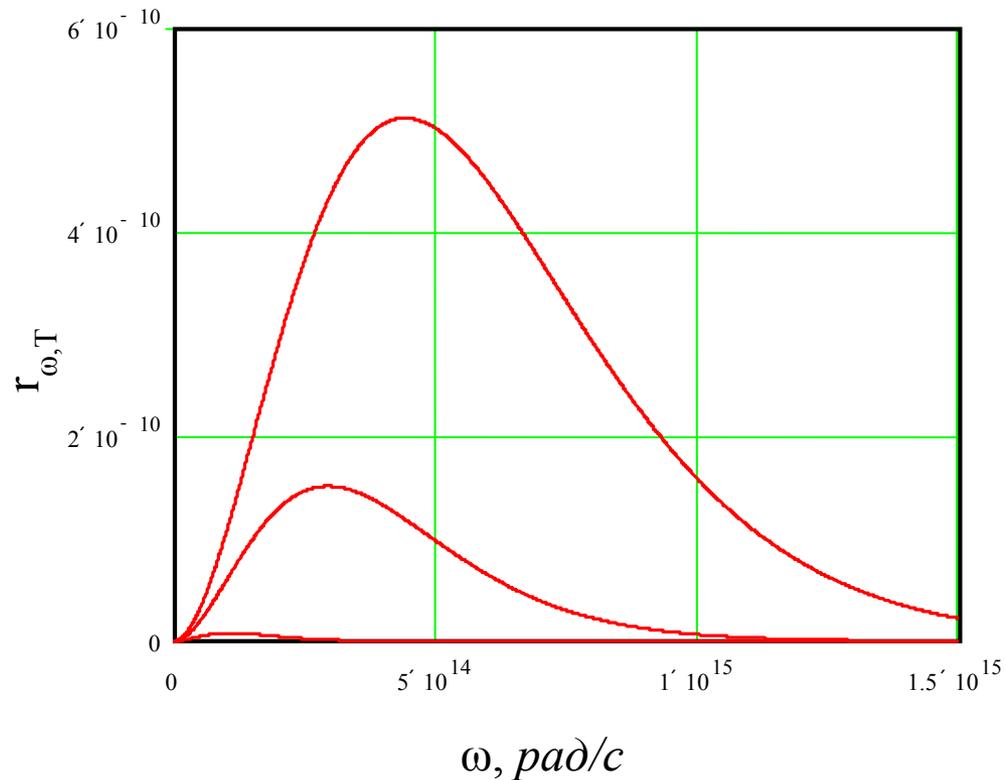
# Тепловое излучение

Свойства:

- Тепловое излучение распространяется по всем направлениям, неполяризовано и некогерентно
- Тепловое излучение имеет сплошной спектр
- Тепловое излучение приводит к термодинамическому равновесию систему тел, обменивающуюся излучением
- Тепловое излучение сильно зависит от температуры источника излучения

# Тепловое излучение

Спектр теплового излучения:



# Тепловое излучение

## Характеристики теплового излучения:

1. Энергетическая светимость – энергия электромагнитных волн, испускаемая единицей площади поверхности тела в единицу времени во всём спектральном диапазоне частот.

$$R_T = \frac{dW}{dS dt} \left[ \frac{\text{Аò}}{\text{ì}^2} \right]$$

# Тепловое излучение

## Характеристики теплового излучения:

2. Испускательная способность тела (спектральная плотность излучения) – энергия излучения, испускаемая единицей площади поверхности тела в единицу времени в единичном интервале частот

$$d R_{\omega, T} = r_{\omega, T} d \omega$$

$$r_{\omega, T} = \frac{d R_{\omega, T}}{d \omega}$$

# Тепловое излучение

Характеристики теплового излучения:

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} \quad d\lambda = -\frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega$$

$$dR_{\lambda,T} = r_{\lambda,T} d\lambda \quad dR_{\omega,T} = r_{\omega,T} d\omega$$

$$dR_{\omega,T} = dR_{\lambda,T} \quad r_{\omega,T} = r_{\lambda,T} \left| \frac{d\lambda}{d\omega} \right| = r_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{2\pi c}$$

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\omega} d\omega$$

# Тепловое излучение

## Характеристики теплового излучения:

3. Поглощательная способность тела – отношение поглощенного телом потока электромагнитных волн к падающему потоку

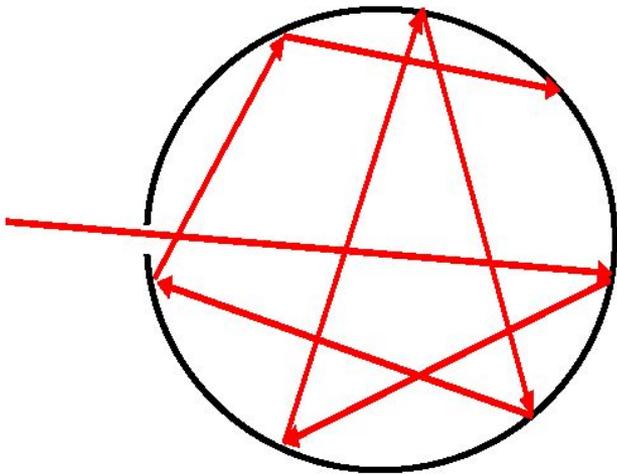
$$a_{\omega, T} = \frac{d\Phi'_{\omega, T}}{d\Phi_{\omega, T}}$$

$$0 \leq a_{\omega, T} \leq 1$$

# Тепловое излучение

## Абсолютно черное тело

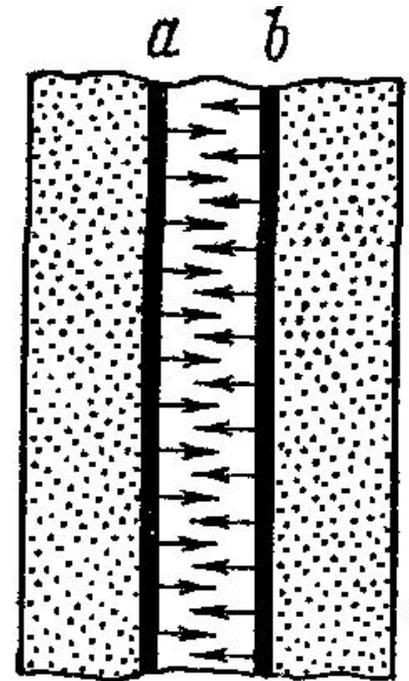
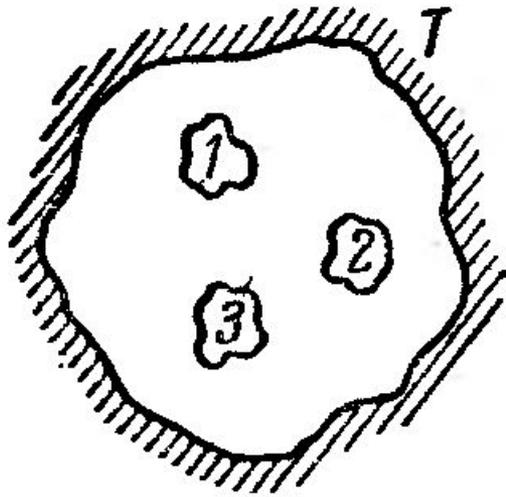
Абсолютно черное тело – это тело, которое полностью поглощает падающее на него излучение во всем спектральном диапазоне и при любой температуре



$$a_{\omega, T} = 1$$

# Тепловое излучение

## Закон Кирхгофа



$$\left( \frac{r_{\omega, T}}{a_{\omega, T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\omega, T}}{a_{\omega, T}} \right)_2 = \dots = r_{\omega, T}^* = f(\omega, T)$$

# Тепловое излучение

## Законы теплового излучения:

### Закон Стефана - Больцмана

$$R_T^* = \int_0^{\infty} r_{\omega, T}^* d\omega = \sigma T^4$$

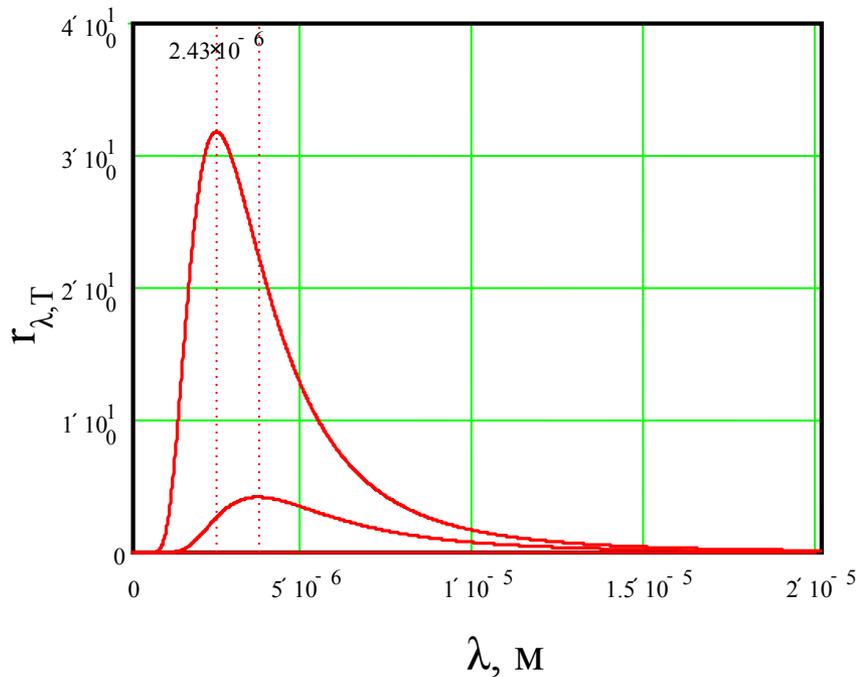
$$\sigma = 5,6686 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$

$$R_T = A_T R_T^* \quad 0,1 \leq A_T \leq 0,9$$

# Тепловое излучение

## Законы теплового излучения:

### Закон смещения Вина



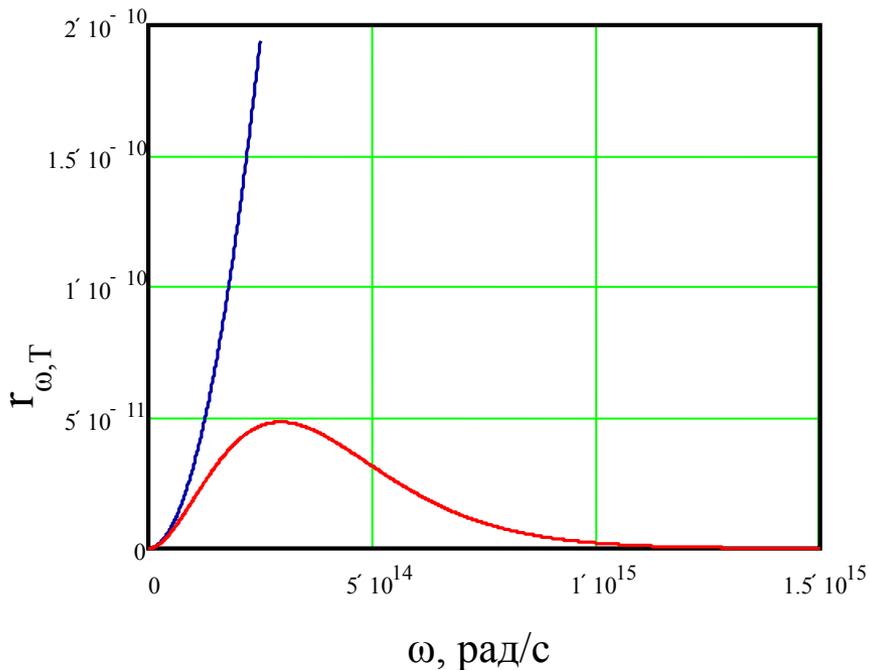
$$T \cdot \lambda_m = b$$

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}$$

# Тепловое излучение

## Теоретическое описание теплового излучения

Формула Рэля – Джинса  
Ультрафиолетовая катастрофа



$$r_{\omega, T}^* = \frac{\omega^2}{4 \pi^2 \tilde{n}^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{\omega^2}{4 \pi^2 \tilde{n}^2} k T$$

# Тепловое излучение

## Теоретическое описание теплового излучения

Гипотеза квантов

Формула Планка

$$\varepsilon = \hbar \omega$$

$$\varepsilon = h \nu$$

$$\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$h = 2 \pi \hbar = 6,62618 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$$

$$r_{\omega, T}^* = \frac{\omega^2}{4 \pi^2 \tilde{\nu}^2} \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} = \frac{\hbar \omega^3}{4 \pi^2 \tilde{\nu}^2} \frac{1}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$$

$$r_{\lambda, T}^* = \frac{4 \pi^2 \hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{2 \pi \hbar c}{kT \lambda}} - 1}$$

# Тепловое излучение

## Теоретическое описание теплового излучения

### Формула Планка

$$\hbar \omega \ll kT$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} \approx \frac{\hbar \omega}{1 + \frac{\hbar \omega}{kT} - 1} = kT$$

$$r_{\omega, T}^* = \frac{\omega^2}{4\pi^2 \tilde{n}^2} kT$$

$$\hbar \omega \gg kT$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} \approx \hbar \omega e^{-\frac{\hbar \omega}{kT}}$$

$$r_{\omega, T}^* = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 \tilde{n}^2} e^{-\frac{\hbar \omega}{kT}}$$

# Тепловое излучение

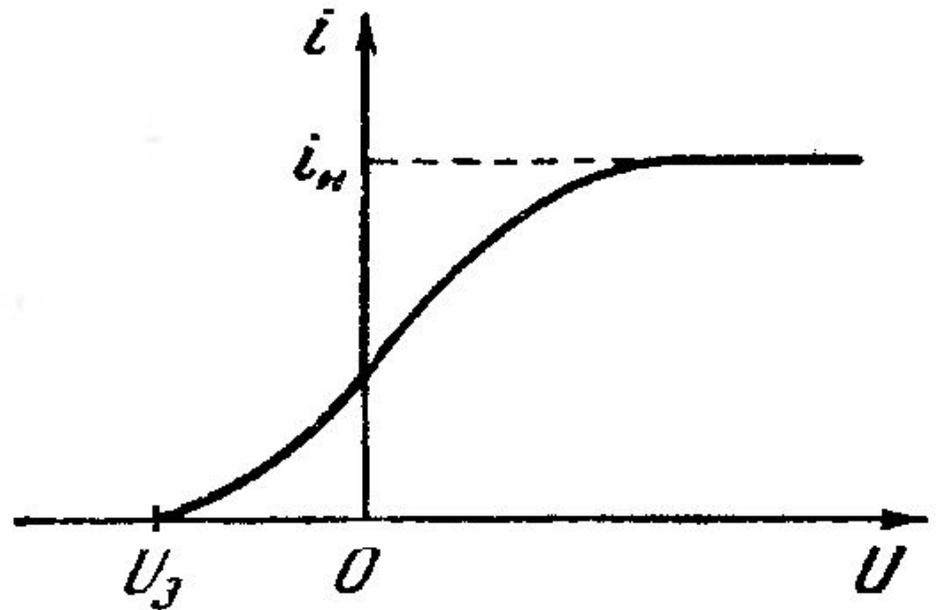
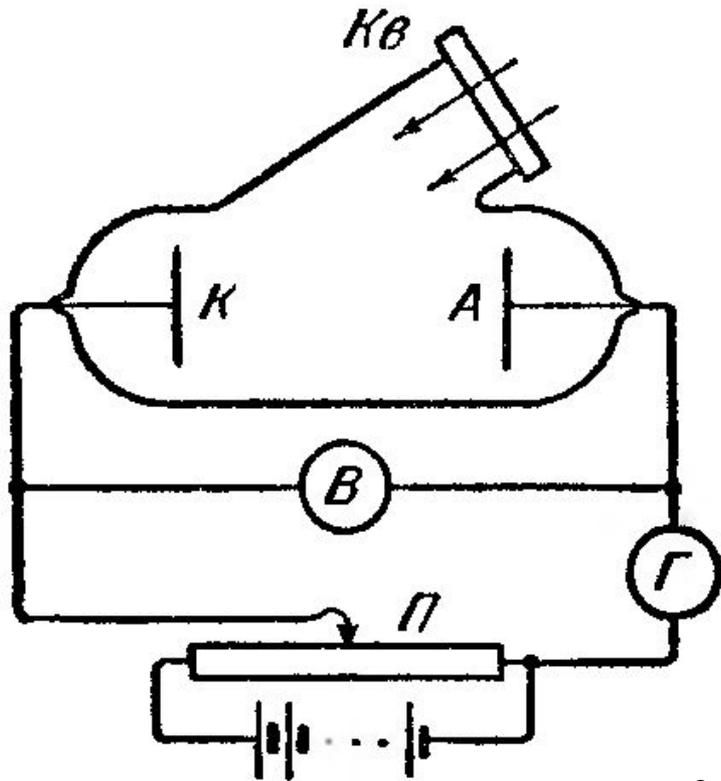
## Теоретическое описание теплового излучения

Вывод законов Стефана – Больцмана и  
Смещения Вина из формулы Планка

$$R_T^* = \int_0^\infty r_{\omega, T}^* d\omega = \frac{\hbar}{4\pi c^2} \left( \frac{kT}{\hbar} \right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} T^4 = \sigma T^4$$

$$\frac{d r_{\lambda, T}^*}{d\lambda} = 0, \quad T \cdot \lambda_m = \frac{2\pi \hbar c}{4,965 k} = b$$

# Фотоэффект



$$\frac{m v_{\max}^2}{2} = eU_{\zeta}$$

# Фотоэффект

## Законы внешнего фотоэффекта

- Фототок насыщения прямо пропорционален падающему на катод световому потоку (число выбитых из катода электронов пропорционально интенсивности света)
- Максимальная начальная скорость фотоэлектронов зависит от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности
- Существует красная граница фотоэффекта – частота излучения, при которой фотоэффект либо начинается, либо прекращается

$$\lambda_{\text{крас}} = \frac{2\pi c}{\omega_{\text{крас}}}$$

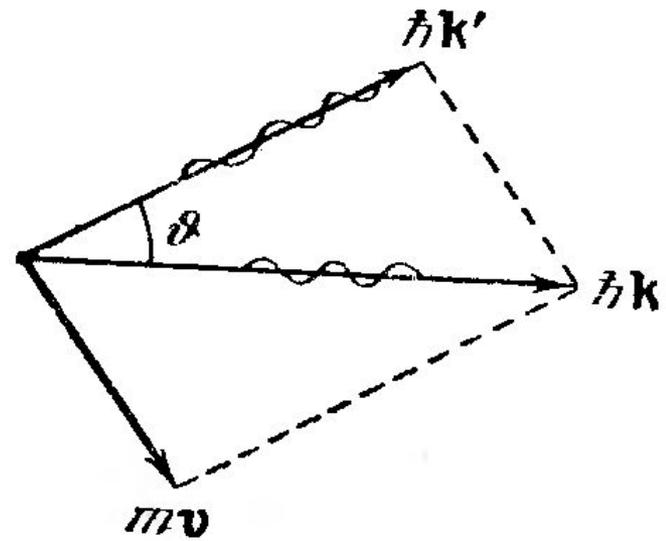
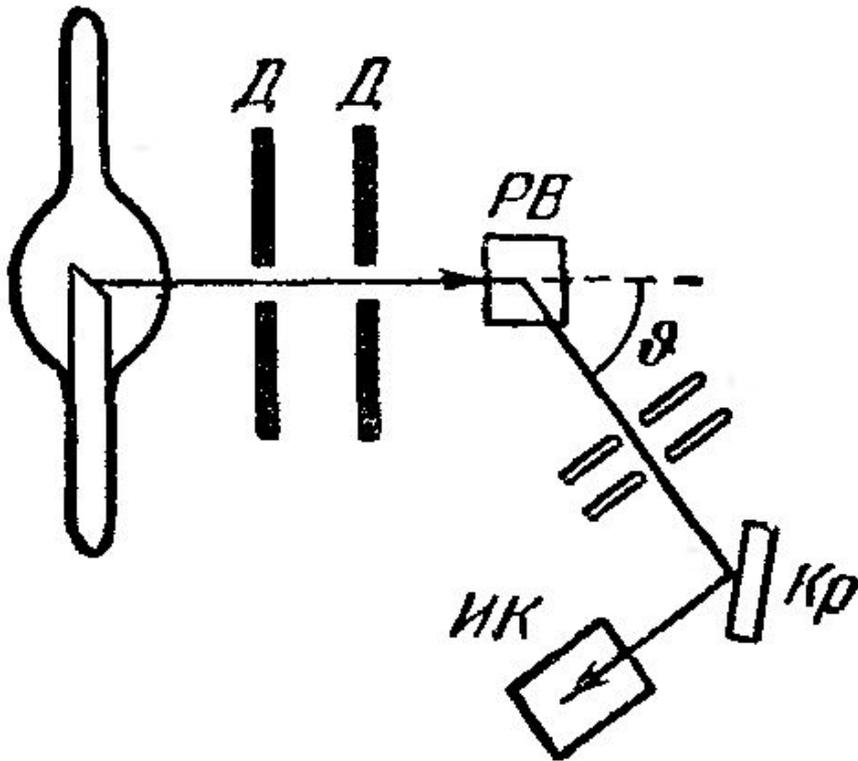
# Фотоэффект

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$\varepsilon_{\delta} = h \nu = A_{\hat{a}\hat{u}\delta} + \frac{m v_{\max}^2}{2}$$

$$h \nu_{\hat{e}\delta} = A_{\hat{a}\hat{u}\delta}, \quad \lambda_{\hat{e}\delta} = \frac{\tilde{n}}{\nu_{\hat{e}\delta}} = \frac{c h}{A_{\hat{a}\hat{u}\delta}}$$

# Эффект Комптона



$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{2 \pi \hbar}{m c} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_c = \frac{2 \pi \hbar}{m c} = 0,0243 \text{ \AA}$$

# ФОТОНЫ

$$\varepsilon_{\delta} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$m_{\delta}c^2 = \varepsilon_{\delta}, \quad m_{\delta} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}, \quad p_{\delta} = m_{\delta}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \hbar p_{\delta} = \hbar k$$

# Корпускулярно-волновой дуализм света

Г. Брэгг: «Свет ведет себя подобно волнам по понедельникам, средам и пятницам, подобно частицам по вторникам, четвергам и субботам и ни с чем не сравним по воскресеньям»