

# *Дисперсия света. Тепловое излучение*

## *Лекция 7*

*Постникова Екатерина Ивановна,  
доцент кафедры экспериментальной физики*

# Дисперсия света

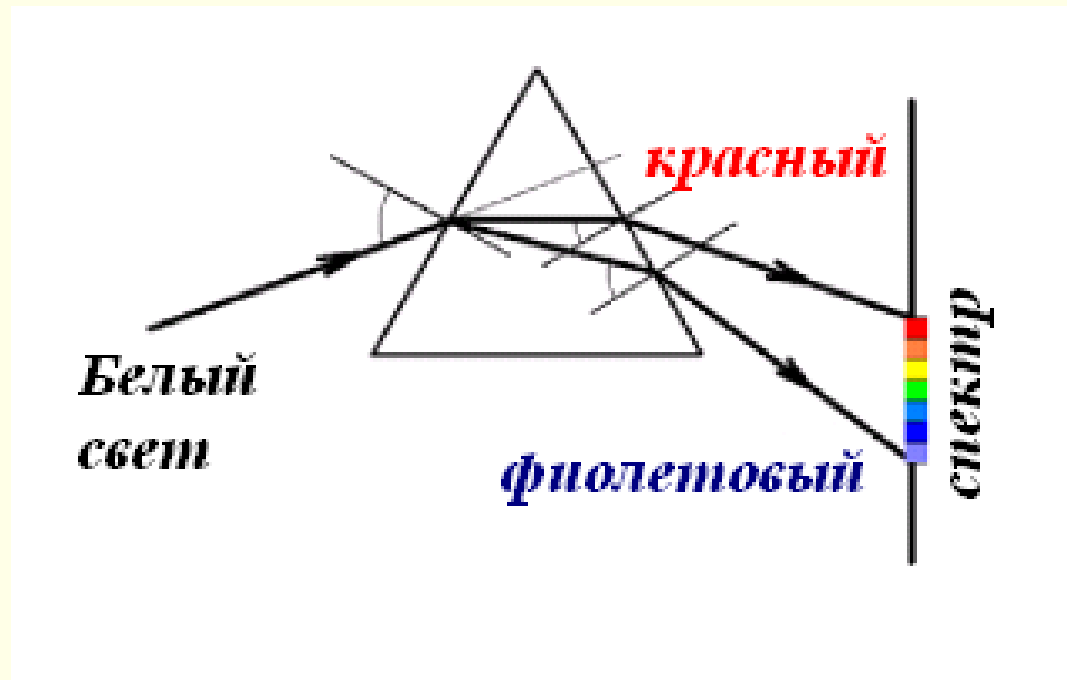
Дисперсия света – зависимость фазовой скорости света (показателя преломления  $n = \frac{c}{v}$ ) в среде от его

частоты (длины волны  $\lambda$ ):  $n = f(\lambda)$ .

**Следствие дисперсии:**  
разложение в спектр пучка белого света при прохождении через призму.

Зависимости

$$n = f(\lambda); \quad n = f(\nu)$$

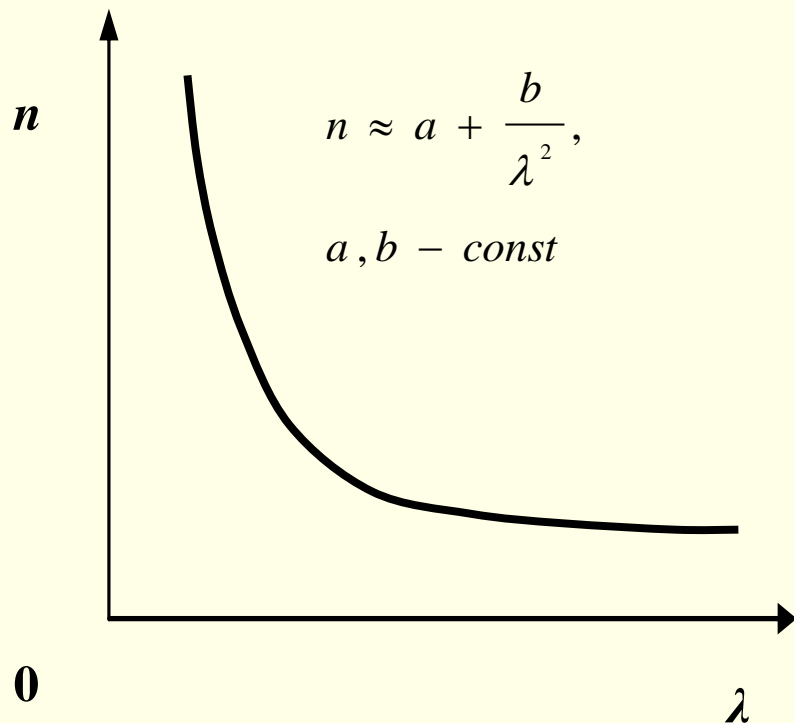


– нелинейные и немонотонные.

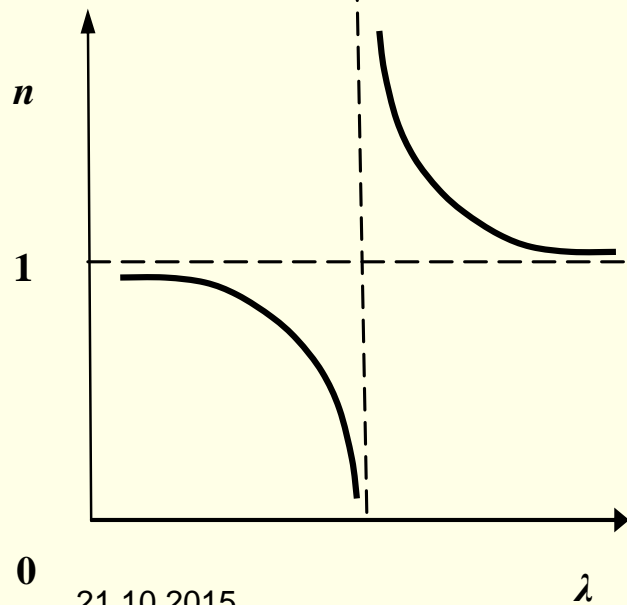
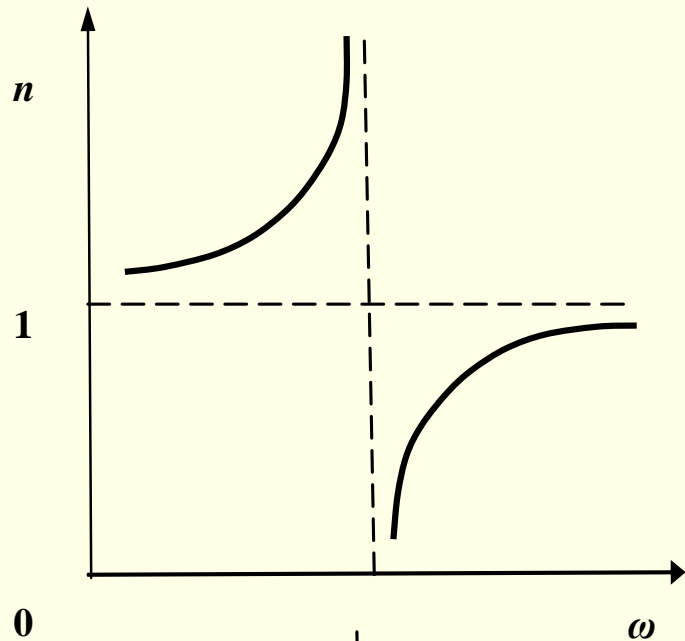
**Дисперсия вещества** – величина, определяемая соотношениями:

$$D = \frac{dn}{d\lambda}; D = \frac{dn}{d\nu}.$$

Показывает, как быстро меняется показатель преломления с длиной волны.



Области значений  $\nu, \lambda$ , в которых дисперсия  $D$  увеличивается по модулю с ростом  $\nu$  соответствуют **нормальной дисперсии света**. Наблюдается у веществ прозрачных для света (стекло).



Если вещество поглощает часть лучей, то в области поглощения и вблизи неё ход дисперсии обнаруживает аномалию, т.е. на некоторых участках более короткие волны преломляются меньше, чем более длинные.

Такой характер дисперсии называется ***аномальной дисперсией***.

Например, у обычного стекла эти полосы находятся в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра.

# **Поглощение (абсорбция) света**

**Поглощение света** – явление уменьшения энергии световой волны при её распространении в веществе, происходящее вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию вещества или энергию вторичного излучения, имеющего другой спектральный состав и иные направления распространения.

Поглощение света может вызывать: нагревание вещества, возбуждение или ионизацию атомов или молекул, фотохимические реакции и другие процессы в веществе.

Описывается *уравнением Бугера-Ламберта*  
(закон Бугера):

$$I = I_0 e^{-\alpha l},$$

$I_0$ ,  $I$  – значения интенсивности света на входе и выходе из слоя среды толщиной  $l$ ,

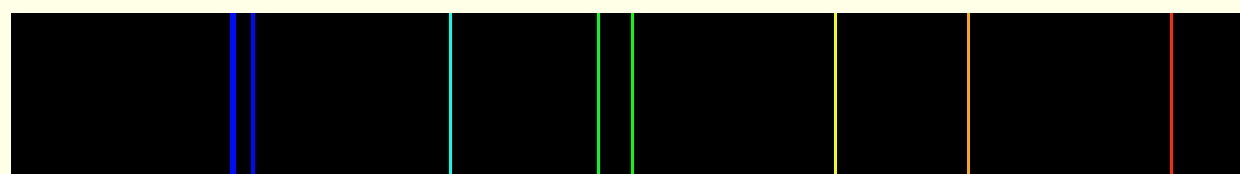
$\alpha$  – показатель поглощения среды (линейный коэффициент поглощения), зависит от химической природы и состояния поглощающей среды и от длины световой волны  $\lambda$ .

При  $l = \frac{1}{\alpha}$  интенсивность света уменьшается в  $e$  раз.

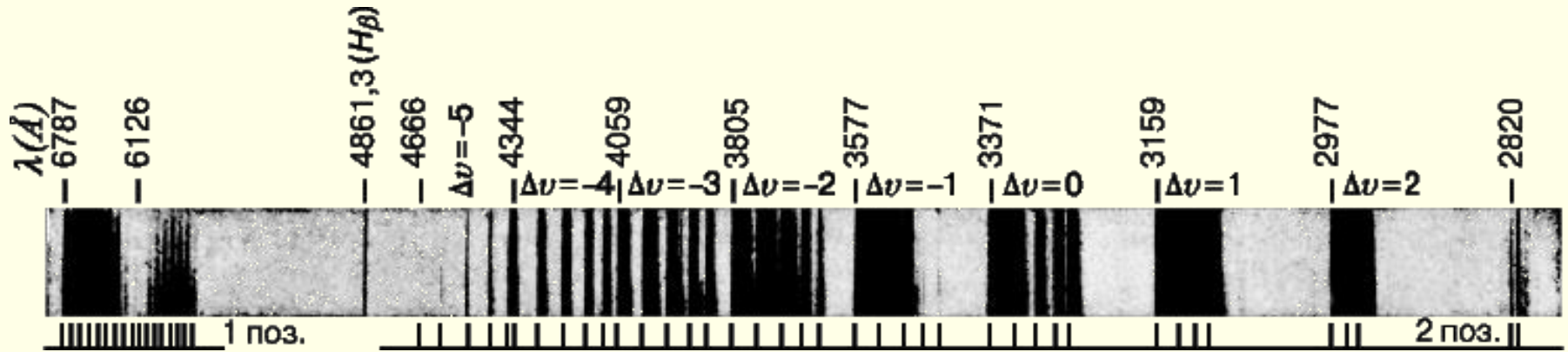
Зависимость  $\alpha(\lambda)$  объясняет окрашенность поглощающих тел. Тело при освещении белым светом будет казаться того цвета,  $\lambda$  которых оно плохо поглощает.

Зависимость  $\alpha(\lambda)$ , характеризующая **спектр поглощения света** в этой среде, связана с явлением резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и атомов в молекулах диэлектрика.

У разряженных одноатомных газов – **линейчатый спектр** поглощения.



У газов с многоатомными молекулами – *полосы поглощения.*

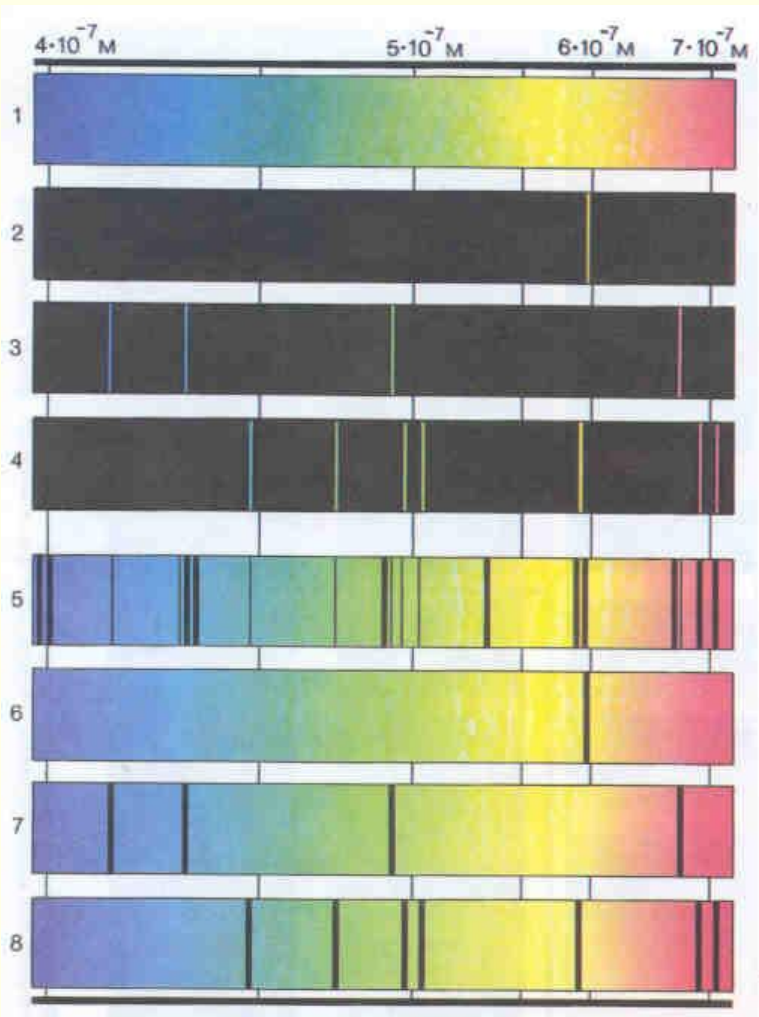


Жидкие и твердые диэлектрики – *сплошной спектр* поглощения (широкие полосы поглощения, в пределах которых  $\alpha \gg 1$ ).





# Спектры испускания и поглощения



## Спектры испускания:

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

## Спектры поглощения:

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

# ***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.

## *Свойства:*

- сплошной спектр,
- положение максимума спектра зависит от температуры
  - температура высокая – излучение коротких электромагнитных волн (видимый свет, ультрафиолет),
  - температура малая – преимущественно длинные электромагнитные волны (инфракрасные),
- может быть равновесие, т.е. тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать:
  - если излучает больше, чем поглощает, то – остывает,
  - если поглощает больше, чем излучает, то – нагревается.

# Характеристики теплового излучения:

**Спектральная плотность энергетической светимости** (излучательности) тела — мощность излучения с единицы площади в интервале частот единичной ширины

$$R_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu + d\nu}^{изл}}{d\nu}, \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{Гц}} = \frac{\text{Дж} / \text{с}}{\text{м}^2 / \text{с}} \right]$$

$$dW_{\nu, \nu + d\nu}^{изл} = R_{\nu, T} \cdot d\nu = f(\nu).$$

$$R_{\nu, T} = R_{\lambda, T} \frac{c}{\nu^2} = R_{\lambda, T} \frac{\lambda^2}{c}.$$

## Интегральная энергетическая светимость:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu, T} d\nu.$$

Поглощение излучения характеризуется **спектральной поглощающей способностью** – показывает, какая доля энергии, приносимой за единицу времени на единицу площади поглощается телом

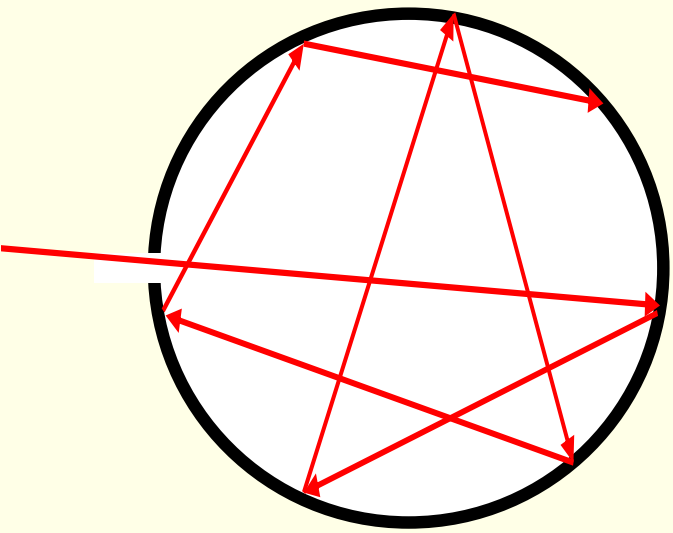
$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu + d\nu}^{погл}}{dW_{\nu, \nu + d\nu}}.$$

$R_{\nu, T}, A_{\nu, T}$  – зависят от природы тела, его температуры  $T$ , частоты излучения.

**Черное тело** – тело способное поглощать при любой температуре всё падающее на него излучение любой частоты.

Следовательно,  $A_{\nu, T (\text{черн. т.})} \equiv 1$ , тождественно 1.

Абсолютно чёрных тел (АЧТ) в природе нет, к нему приближаются в определенном интервале частот сажа, платиновая чернь, черный бархат.



*Модель черного тела* – замкнутая полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которого зачернена.

## *Серое тело*: поглощающая способность

$$A_{\nu, T (\text{сер.т.})} = \text{const} < 1$$

одинакова для всех частот и зависит только от температуры  $T$ , материала и состояния поверхности,

$$A_{\nu, T (\text{сер.т.})} = A(T).$$

# Закон Кирхгофа.

Закон Кирхгофа (основан на втором законе термодинамики, определяет условие равновесного излучения): *отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощающей способности не зависит от природы тела и является функцией  $(\nu, T)$ .*

$$\frac{R_{\nu, T}}{A_{\nu, T}} = r(\nu, T) - \text{универсальная функция Кирхгофа.}$$

Для абсолютно черного тела  $A_{\nu, T} \equiv 1 \Rightarrow r(\nu, T)_{\text{чТ}} = R_{\nu, T \text{ чТ}}$

Функция Кирхгофа равна спектральной плотности энергетической светимости черного тела.



Для всех тел:  $\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = R_{\nu,T \text{ чТ}}$  черного тела при той же  $T$  и  $\nu$ .

Для серого тела:  $A_{\nu,T} < 1 \Rightarrow R_{\nu,T} < r(\nu, T) \Rightarrow$

- спектральная плотность энергетической светимости

$$R_{\nu,T} < R_{\nu,T \text{ чТ}} ,$$

если  $A_{\nu,T} = 0 \Rightarrow R_{\nu,T} = 0 \Rightarrow$

- если тело при данной  $T$  не поглощает электромагнитные волны с частотами  $(\nu, \nu+d\nu)$ , то оно при этой  $T$  не излучает волны с частотой  $(\nu, \nu+d\nu)$ .

# Интегральная энергетическая светимость серого тела:

$$R_{T_{\text{сер.м.}}} = \int_0^{\infty} R_{\nu, T} d\nu = \int_0^{\infty} \underbrace{A_{\nu, T}}_{A_T = \text{const}} r(\nu, T) d\nu = A_T \int_0^{\infty} \underbrace{r(\nu, T)}_{\underbrace{R_{\nu, T_{\text{чТ}}}}_{R_e}} d\nu = A_T \cdot R_e.$$

$A_T$  – поглощающая способность серого тела одинакова для всех  $\nu$  (т.к.  $A_T = \int A_{\nu, T} d\nu$ ) и зависит только от  $T$ .

$R_e$  – интегральная энергетическая светимость черного тела зависит только от  $T$ .

Для того чтобы определить светимость надо знать поглощающую способность серого тела  $A_T$  и  $R_e$  черного тела.  $R_e = \frac{c}{4} \omega$ ,

$\omega$  – объемная плотность энергии излучения черного тела,  $c$  – скорость света.

# Закон Стефана-Больцмана

Интегральная энергетическая светимость чёрного тела:

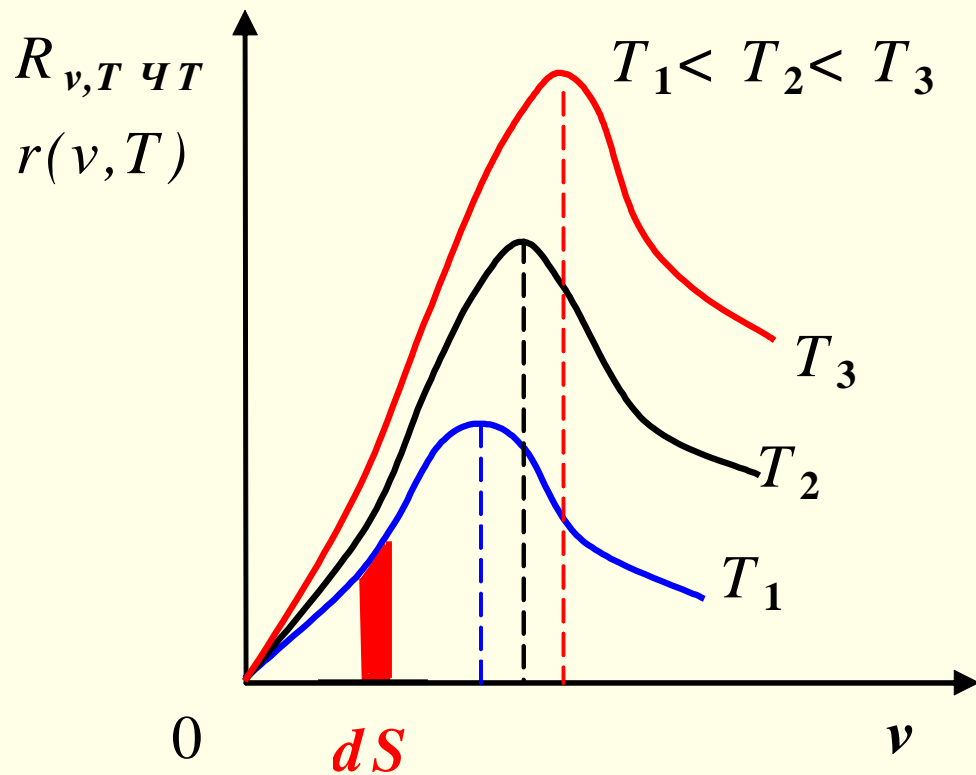
$$R_e = \sigma T^4,$$

$\sigma = 5,57 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup> – постоянная Стефана-Больцмана,  
 $T$  – абсолютная температура.

Закон не говорит о спектральном составе излучения  
чёрного тела.

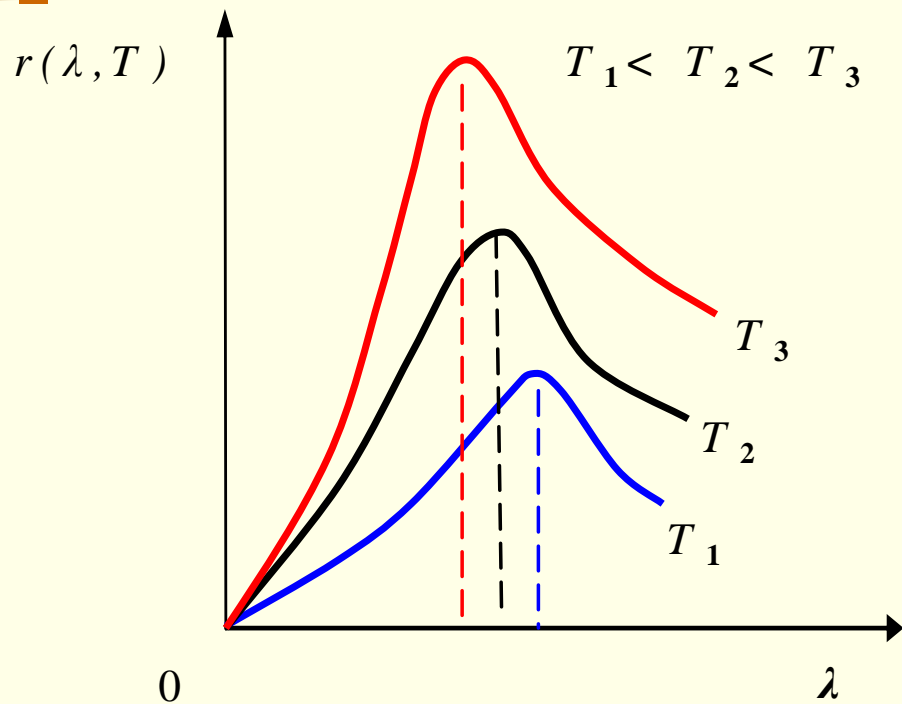
# Закон смещения Вина

Распределение энергии в спектре черного тела – неравновесное, имеет максимум (экспериментальные данные).



Площадь  $dS$  под кривой пропорциональна спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела:

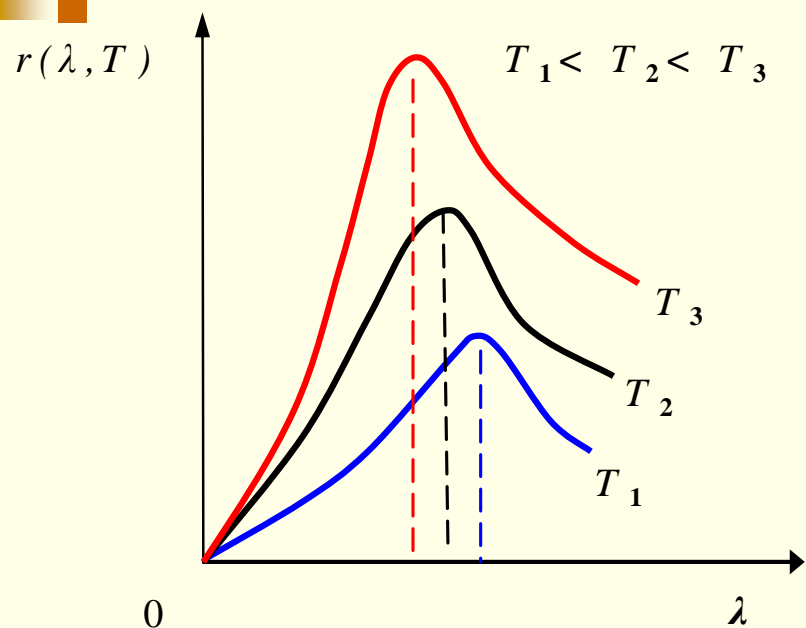
$$\int_{\nu}^{\nu + d\nu} r(\nu, T) d\nu \sim R_e \sim T^4.$$



**Закон смещения Вина.**  
 Длина волны, соответствующая максимуму  $r_{\lambda, T}$ :

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

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



С ростом  $T$ , частота, которая соответствует максимуму спектральной плотности, смещается в сторону более высоких частот и, соответственно, в область более коротких длин волн.

Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости от температуры:

$$r_{\lambda, T \max} = C \cdot T^5, \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \sim \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}} \right]$$

$$C = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}.$$

В области больших частот спектральная плотность энергетической светимости чёрного тела описывается формулой Вина (закон Вина):

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}},$$

$h$  – постоянная Планка .

## Формула Рэля-Джинса.

### «Ультрафиолетовая катастрофа»

На основе законов статистической физики и классического закона равномерного распределения энергии по степеням свободы была получена формула Рэля-Джинса:

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

$\langle \mathcal{E} \rangle = kT$  – средняя энергия осциллятора (атома),

$\nu$  – частота осциллятора,

$k$  – постоянная Больцмана,

$c$  – скорость света.



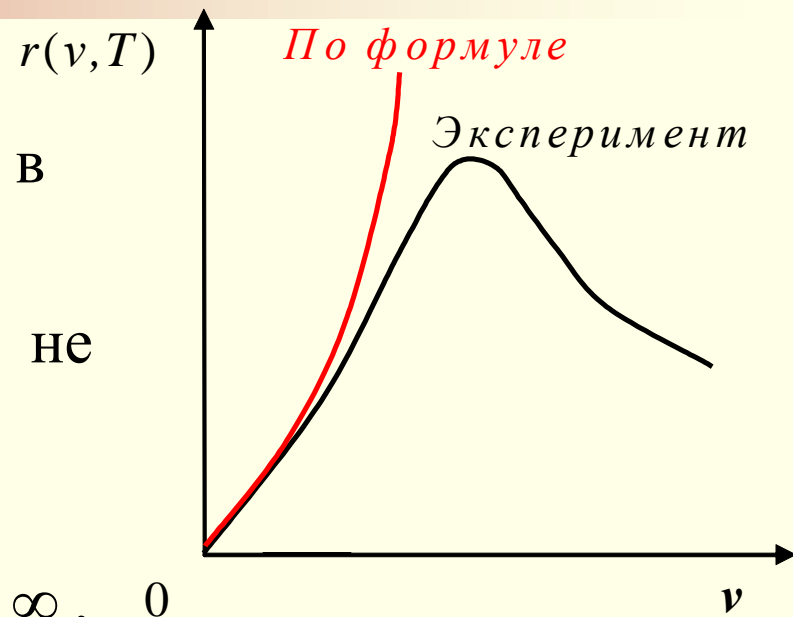
Формула Рэля-Джинса согласуется с экспериментальными данными только в области малых частот.

Из формулы Рэля-Джинса не получается закон Стефана-Больцмана:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty, \quad 0$$

т.е. при любой  $T$  энергетическая светимость АЧТ ( $R_e$ ) и объемная плотность энергии ( $\omega$ ) равновесного излучения бесконечно велика, что является абсурдным выводом. Этот результат получил название «ультрафиолетовая катастрофа».

**Вывод:** в рамках классической физики не удаётся объяснить закономерности распределения энергии в спектре АЧТ.



# *Квантовая гипотеза Планка.*

## *Распределение Планка*

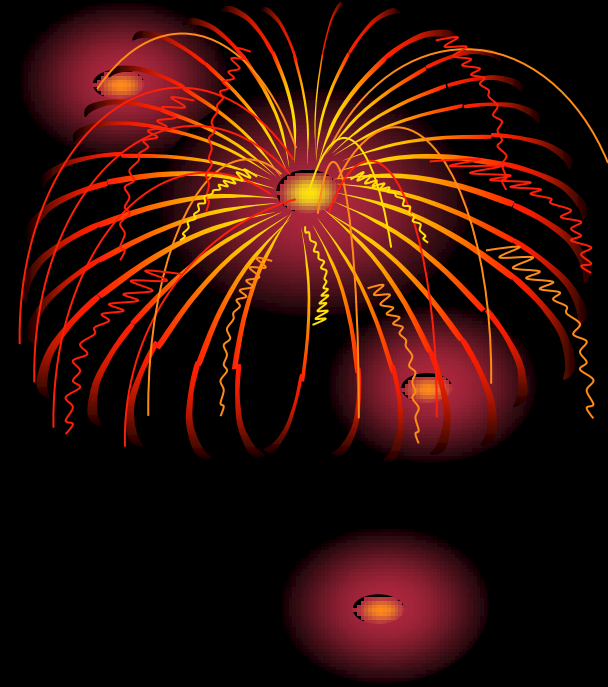
Спектральные закономерности излучения АЧТ удалось объяснить Планку. Он предположил, что энергия атомов (осцилляторов) меняется не непрерывно, а дискретно, и они излучают энергию порциями (квантами)  $E \sim \nu_{\text{колебаний}}$ :

$$\mathcal{E}_0 = h \nu = h \frac{c}{\lambda},$$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с – постоянная Планка .

Энергия осциллятора может принимать лишь определённые дискретные значения:

$$\mathcal{E} = n \mathcal{E}_0, \quad n = 0, 1, 2 \dots$$



***Конец лекции***