

Тепловое излучение

Характеристики теплового излучения

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

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

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

$dW^{изл}$ можно представить, как функцию от λ .

$$\left. \begin{aligned} dW^{изл} &= R_{\lambda,T} \cdot d\lambda = R_{\nu,T} \cdot d\nu \Rightarrow R_{\nu,T} = R_{\lambda,T} \frac{d\lambda}{d\nu}, \\ \lambda = \frac{c}{\nu} &\Rightarrow \left| \frac{d\lambda}{d\nu} \right| = \frac{c}{\nu^2} = \frac{\lambda^2}{c}. \end{aligned} \right\}$$

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

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

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

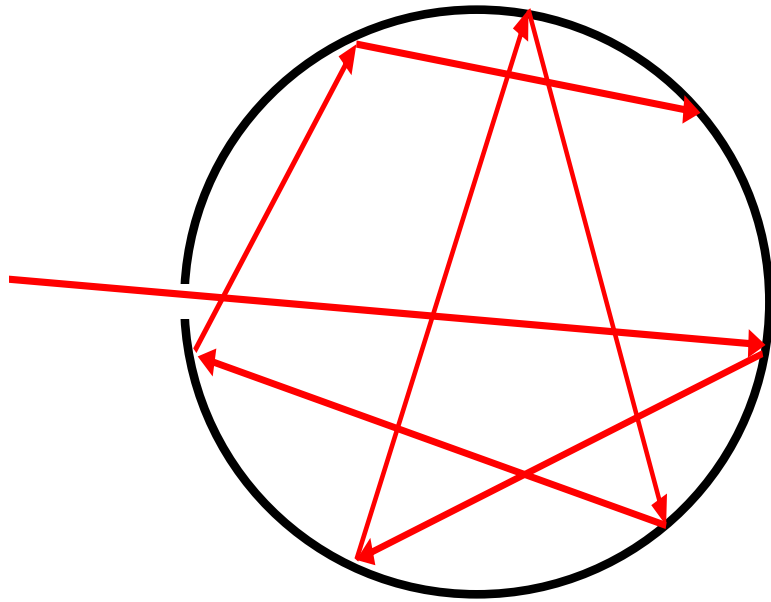
$R_{\nu,T}, A_{\nu,T}$ – зависят от природы тела, его температуры T , частоты излучения.

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

Следовательно,

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

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.

Луч света, попавший внутрь, испытывает
многократное отражение от стенок. Интенсивность
вышедшего излучения стремится к 0.

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.

Распределение энергии в спектре АЧТ

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 (ν, T) .

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

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r(\nu, T)$$

Для АЧТ: $A_{\nu,T} \equiv 1 \Rightarrow r(\nu, T)_{\text{ЧТ}} = R_{\nu,T \text{ ЧТ}} \Rightarrow$

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 ν .

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r(\nu, T)$$

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

- спектральная плотность энергетической светимости $R_{\nu,T} < R_{\nu,T \text{ ч}T}$,

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:

$$\begin{aligned} R_{T_{\text{сер.т.}}} &= \int_0^{\infty} R_{\nu, T} d\nu = \int_0^{\infty} \underbrace{A_{\nu, T}}_{A_T = \text{const}} r(\nu, T) d\nu = \\ &= A_T \underbrace{\int_0^{\infty} \underbrace{r(\nu, T)}_{R_{\nu, T_{\text{чт}}}} d\nu}_{R_e} = A_T \cdot R_e. \end{aligned}$$

A_T — поглощающая способность серого тела
одинакова для всех ν ($A_T = \int_0^{\infty} A_{\nu, T} d\nu$)
и зависит только от T .

R_e — интегральная энергетическая светимость
черного тела зависит только от T .

$$R_{T_{\text{сер.т.}}} = A_T \cdot R_e.$$

Для того чтобы определить светимость
надо знать поглощающую способность
серого тела A_T и R_e черного тела.

$$R_e = \frac{c}{4} \omega,$$

ω – объемная плотность энергии
излучения черного тела,

c – скорость света.

Закон Стефана-Больцмана

Интегральная энергетическая светимость
чёрного тела:

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

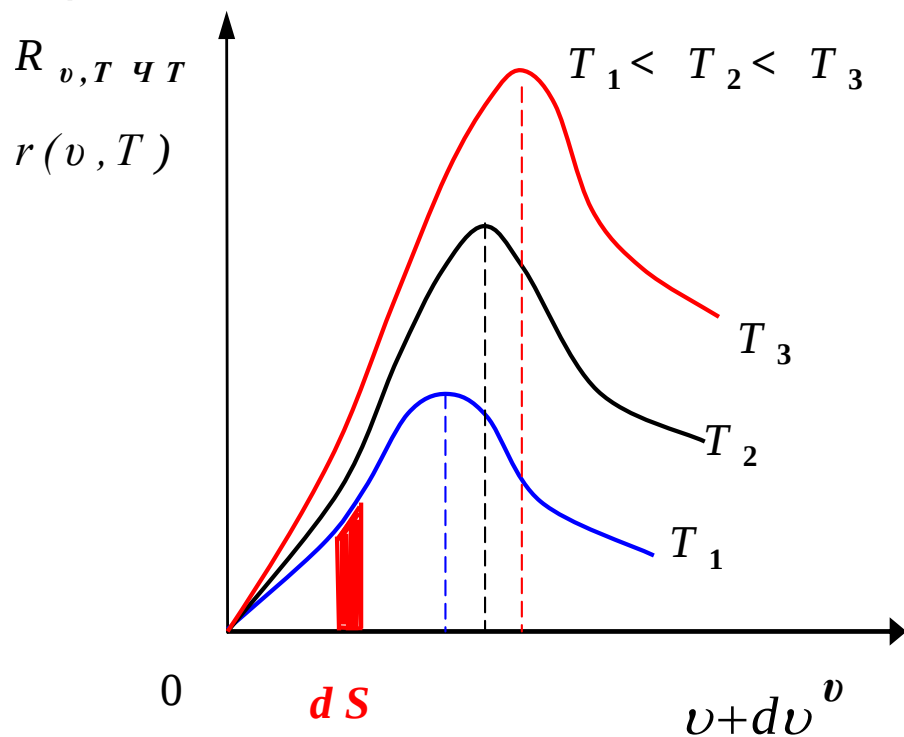
$\sigma = 5,57 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ – постоянная
Стефана-Больцмана,

T – абсолютная температура.

Закон не говорит о спектральном составе
излучения черного тела.

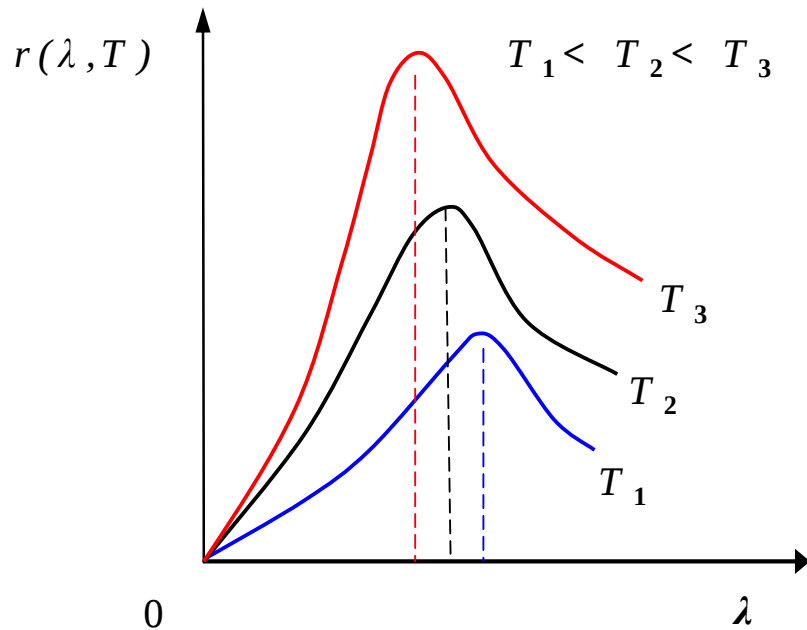
Закон Стефана-Больцмана

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



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

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



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:

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

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

В области больших частот спектральная плотность энергетической светимости чёрного тела описываются *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»

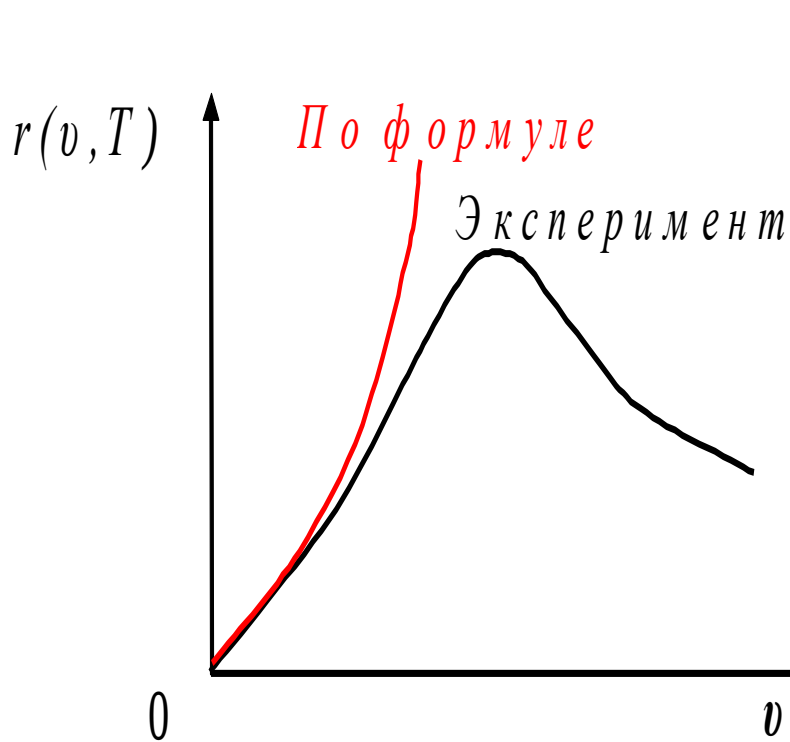
На основе законов статистической физики и классического закона равномерного распределения энергии по степеням свободы была получена формула Рэля-Джинса:

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

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

ν — частота осциллятора,

k — постоянная Больцмана, c — скорость света.



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

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

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

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

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

т.е. при любой T энергетическая светимость АЧТ (R_e) и объемная плотность энергии (ω) 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) $\mathcal{E} \sim \nu_{\text{колебаний}}$.

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

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

Энергия осциллятора может принимать
лишь определённые дискретные
значения: $\mathcal{E} = n\mathcal{E}_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots$

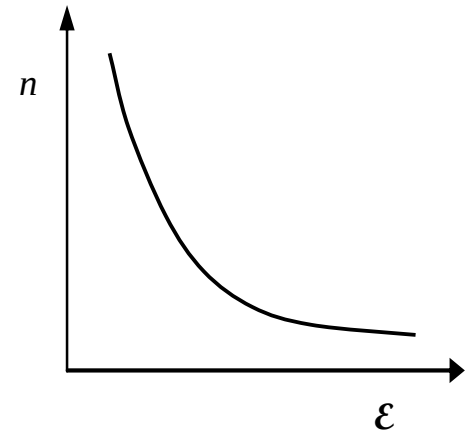
Если считать, что распределение осцилляторов
по возможным дискретным энергетическим
уровням описывается законом

Больцмана

$$dn = Ce^{-\frac{\mathcal{E}}{kT}} dV,$$

тогда средняя энергия
осциллятора окажется:

$$\langle \mathcal{E} \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$



спектральная плотность энергетической
светимости АЧТ:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\omega^2}{c^2} \langle \mathcal{E} \rangle = \frac{2\pi\omega^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

Эта формула хорошо
согласуется с
экспериментальными
данными во всём интервале
частот и при различных T
и позволяет вычислить константы
законов теплового излучения (σ , b).

