

Тепловое излучение

Тела, нагретые до достаточно высоких температур, светятся.

Тепловое излучение совершается за счет энергии теплового движения атомов вещества и свойственно всем телом, нагретым свыше 0 К.

Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром. При высоких температурах излучаются короткие (видимые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны, при низких инфракрасные.

Тепловое излучение - единственный вид излучения, который может быть равновесным

Характеристики теплового излучения

- 1) Φ – полный поток излучения – энергия всех электромагнитных волн, протекающих за единицу времени, через рассматриваемую площадь S .

$$\Phi = \frac{dW}{dt}$$

$$\Phi = \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{прож}}$$

Пусть на тело падает поток излучения Φ , часть потока отразится, часть поглотится, Разделим обе части на Φ .

$$\frac{\Phi}{\Phi} = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi} + \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi} + \frac{\Phi_{\text{проп}}}{\Phi}$$

$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

ρ_{λ} — коэффициент отражения или отражательная способность. $\rho_{\lambda} = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi}$

α_{λ} — коэффициент поглощения.

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi}$$

τ_λ — пропускная способность или коэффициент пропускания.

если тело непрозрачное, то $\tau = 0$

$$1 = \rho + \alpha$$

Опыт показывает, что все коэффициенты зависят от

и температуры. Для монохроматического излучения эти коэффициенты называются спектральными.

Тело, которое поглощает все падающее на него излучения любой длины волны при любой температуре называется АЧТ (абсолютно черное тело). $\alpha = 1$ $\rho = 0$

Пример: сажа, черный бархат.

λ

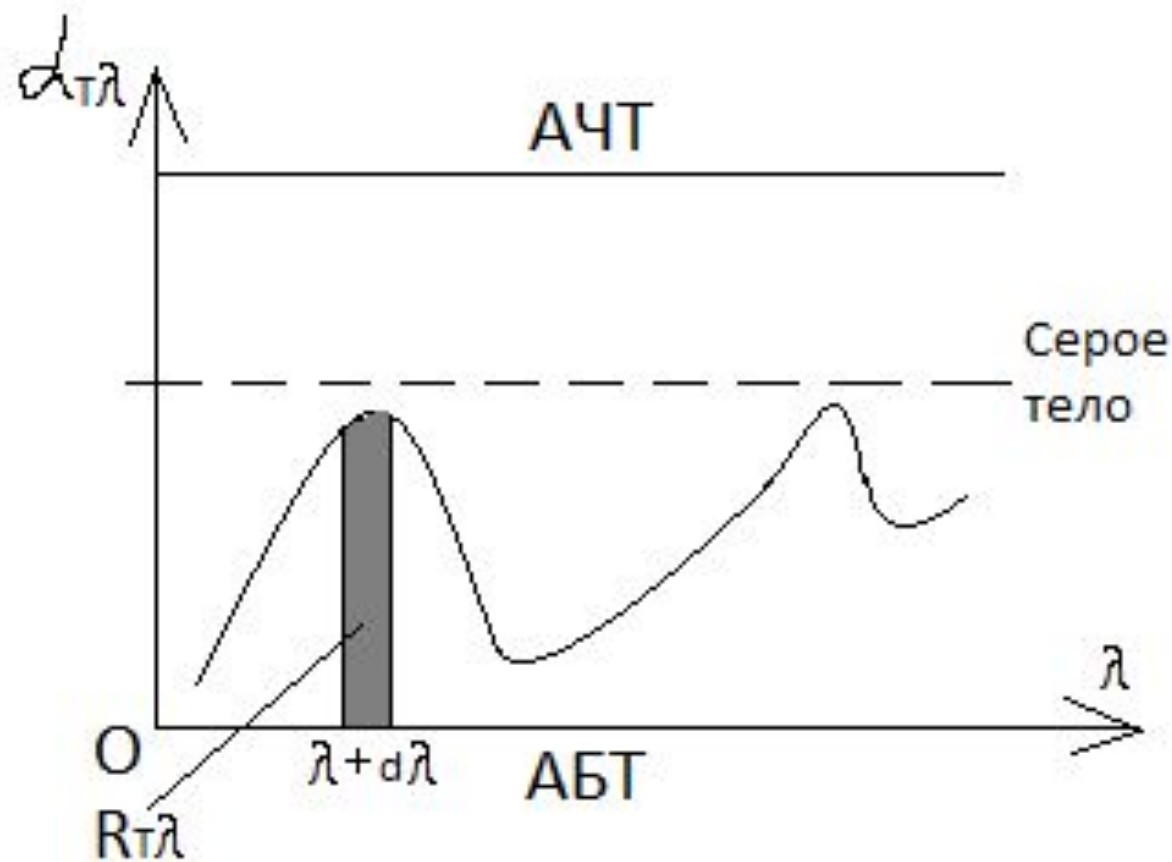
Имеется модель АЧТ. Это плоскость с маленьким отверстием величиной d .



Тело, которое не поглощает, а отражает все падающее на него излучения называется АБТ (абсолютно белым телом)

Тело, поглощательная способность которого одинакова для всех волн называется серым телом.

$$\alpha = \text{const} < 1$$



2) Энергетическая светимость тела $R_T = \frac{W_{\text{из}}}{St}$
Энергия, излученная с единицы поверхности нагретого тела в единицу времени по всем видам волн при заданной температуре $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right]$

3) Спектральная плотность энергетической светимости.

Энергия, излученная с единицы поверхности в единицу времени в единичном интервале длин волн вблизи определенной длины волны при данной температуре

$$r_{\lambda T} = \frac{W_{\lambda T \text{ изл}}}{St d\lambda} \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right]$$

$$dR_T = r_{\lambda T} d\lambda, \quad R_T = \int dR_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda$$

Законы теплового излучения. Закон Кирхгофа

Опираясь на 2 начало термодинамики и анализируя условия равновесного излучения в изолированной системе Кирхгоф установил количественную связь между энергетической светимостью тела и спектральной поглощательной способностью.

$$(R_T / \alpha)_1 = (R_T / \alpha)_2 = R_{\text{э}}$$

Закон Кирхгофа: отношение энергетической светимости тела к коэффициенту поглощения α для любых тел, есть величина постоянная, не зависящая от природы тел и равная энергетической светимости АЧТ при данной температуре $R_{\text{э}}$.

Для спектральных величин: отношение спектральной плотности энергетической светимости и коэффициента поглощения для любых тел при одинаковой температуре для одной и той же λ одинаково и не зависит от природы тел, это отношение равно спектральной плотности энергетической светимости АЧТ.

$$\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} = r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}$$

Из выражения следует, что излучение, которое тело сильнее поглощает, сильнее и испускает. Для АЧТ $\alpha=1$, для других тел $\alpha < 1$, $T = \text{const} \Rightarrow$

$$r_{\lambda T} < r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}$$

Излучение, которое не подчиняется закону Кирхгофа, не является тепловым.

Законы излучения АЧТ

АЧТ наиболее сильный излучатель

1. Закон Стефана-Больцмана: энергетическая светимость АЧТ пропорциональна T^4

где $R_{\Sigma} = \sigma T^4$ - постоянная Стефана-Больцмана

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$$

Энергия, излучаемая всей поверхностью тела за определенное время:

$$W = \sigma T^4 \cdot S \cdot t$$

2) Закон смещения Вина: длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, обратно пропорциональна ее температуре.

$$\lambda = \frac{b}{T}$$

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

3) Второй закон Вина: максимум спектральной плотности энергетической светимости АЧТ тела увеличивается пропорционально пятой степени его температуры.

$$(r_{\lambda T})_{max} = cT^5$$

$c = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Дж/м² с м К⁵- постоянная Вина

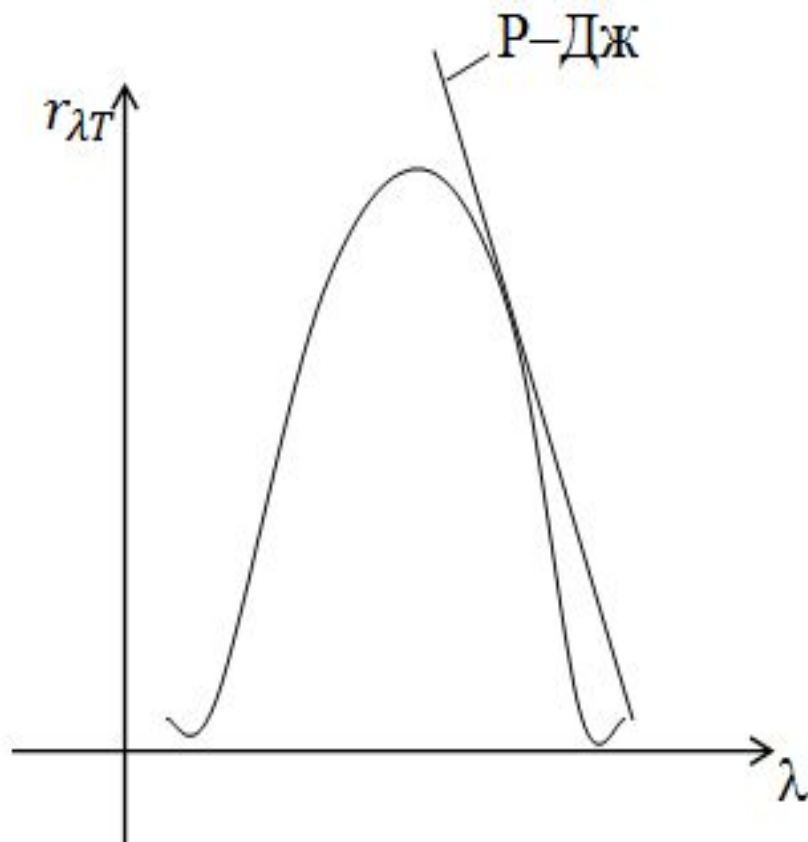
Однако все эти законы не решают задачу о распределении энергии в спектре АЧТ по длинам волн.

Квантовая гипотеза. Формула Планка

Строгая попытка теоретического вывода была сделана Рэлеем и Джинсом. Источником электромагнитных волн являются колеблющиеся атомы нагретого тела, которые являются гармоническими осцилляторами.

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

Это уравнение согласуется с экспериментом в области больших длин волн и высоких температур. В области коротких длин волн формула Рэлея-Джинса резко расходится с экспериментом и законами смещения Вина.



Попытка получить закон Стефана-Больцмана из данной формулы приводит к абсурду.

$$R_{\Sigma} = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda = \infty$$

этот результат называли ультрафиолетовой катастрофой.

Таким образом, в рамках классической физики не удалось объяснить закон распределения энергии в спектре излучения АЧТ.

Электромагнитная теория оказалась не применимой.

Формула Планка и ее следствия

В 1900 году Макс Планк высказал гипотезу, что поглощение и испускание энергии возможно только отдельными порциями, которые получили название *квантов энергии*.

$$\varepsilon = h\nu \quad \varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$$

$h=6.62 \cdot 10^{-34}$ постоянная Планка

Излучение нагретого тела – это поток локализованных в пространстве дискретных квантов, движущихся со скоростью света. Кванты электромагнитного излучения называются *фотонами*.

$$m_{\phi} \cdot c^2 = h\nu \quad \rightarrow \quad m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

Фотон – это элементарная частица, всегда движущаяся со скоростью света, имеющая массу покоя равную нулю.

$$p_{\phi} = m_{\phi} \cdot c = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c} = \boxed{\frac{h}{\lambda}} - \text{импульс фотона}$$

Согласно гипотезе Планка атомные осцилляторы излучают энергию не непрерывно (в классической механике), а отдельными порциями \Rightarrow

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$$r_{\lambda T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \langle \varepsilon \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{2\pi\nu^3 h}{c^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)}$$

$$\boxed{r_{\lambda T} = \frac{2\pi\nu^3 h}{c^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)}} - \text{формула Планка}$$

1) Если $T \rightarrow \infty$ $e^0 = 1$ $r_{\lambda T} \rightarrow \infty$

При уменьшении частоты $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$ поэтому приходим к ф. Релея-Джинса

2) При увеличении частоты или уменьшении λ $r_{\lambda T} \rightarrow 0$.

Оперируя формулой Планка, можно получить все законы теплового излучения.

Оптическая пирометрия

Это совокупность методов измерения высоких температур, основанных на законах теплового излучения.

- 1) Радиационная температура T_p . Основа на законе Стефана-Больцмана. Измеряется температура при которой энергетическая светимость АЧТ равна энергетической светимости исследуемого тела.

$$R_{\text{з}}^{\text{АЧТ}} = R_{\text{Т}}^{\text{иссл.т.}}$$

$$R_{\text{Т}} = \sigma T_p^4 \quad T = \sqrt[4]{\frac{R_{\text{Т}}}{\sigma}}$$

если тело не черное, то вволится некоторый коэффициент $k < 1$

$$R_T = k\sigma T^4$$

$$k\sigma T^4 = \sigma T_p^4 \rightarrow T = \sqrt[4]{T_p^4 \cdot k}$$

$$T_p < T_{ист}$$

2) Цветовая температура $T_{ц}$
Основана на законе смещения Вина. С помощью оптического пирометра определяется, где находится максимальная длина волны, которая соответствует max спектральной плотности энергетической светимости исследуемого тела.

$$T_{ц} = \frac{B}{\lambda_{max}}$$

$$T_{ц} < T_{ист}$$

3) Яркостная температура T
 Температура АЧТ, при которой для
 определенной длине волны спектральная
 плотность энергетической светимости равна
 спектральной плотности энергетической
 светимости исследуемого тела.

по закону Кирхгофа запишем

$$r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}} = r_{\lambda T}^{\text{Иссл}} (*)$$

$$\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_T} = r_{\lambda T \text{ Яр}}^{\text{АЧТ}}$$

$$\alpha = \frac{r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}}{r_{\lambda T \text{ Яр}}^{\text{АЧТ}}}$$

Пример использования: пирометр с исчезающей нитью.

Некая нить пирометра выбирается так, чтобы выполнялось условие(*). Изображение нити пирометра при данной температуре, становится неразличимым на фоне поверхности раскаленного тела.

$$\text{Т.к. } \alpha < 1 \Rightarrow T_{\text{Яр}} < T_{\text{ист.}}$$

4) Тепловые источники света – свечение раскаленных тел используется для создания источников света.