

# 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)  $\Phi$  – 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  $\Phi$ , часть потока отразится, часть поглотится, Разделим обе части на  $\Phi$ .

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

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

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

$\alpha_{\lambda}$  — коэффициент поглощения.

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

$\tau_\lambda$  — пропускная способность или коэффициент пропускания.

если тело непрозрачное,  
то  $\tau = 0$

$$1 = \rho + \alpha$$

Опыт показывает, что все коэффициенты зависят от

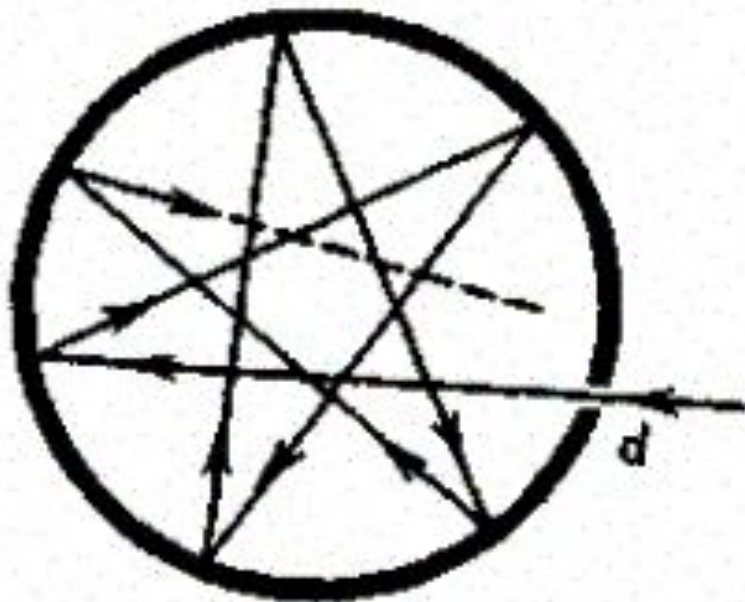
и температуры. Для монохроматического излучения эти коэффициенты называются спектральными.

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.

$\lambda$

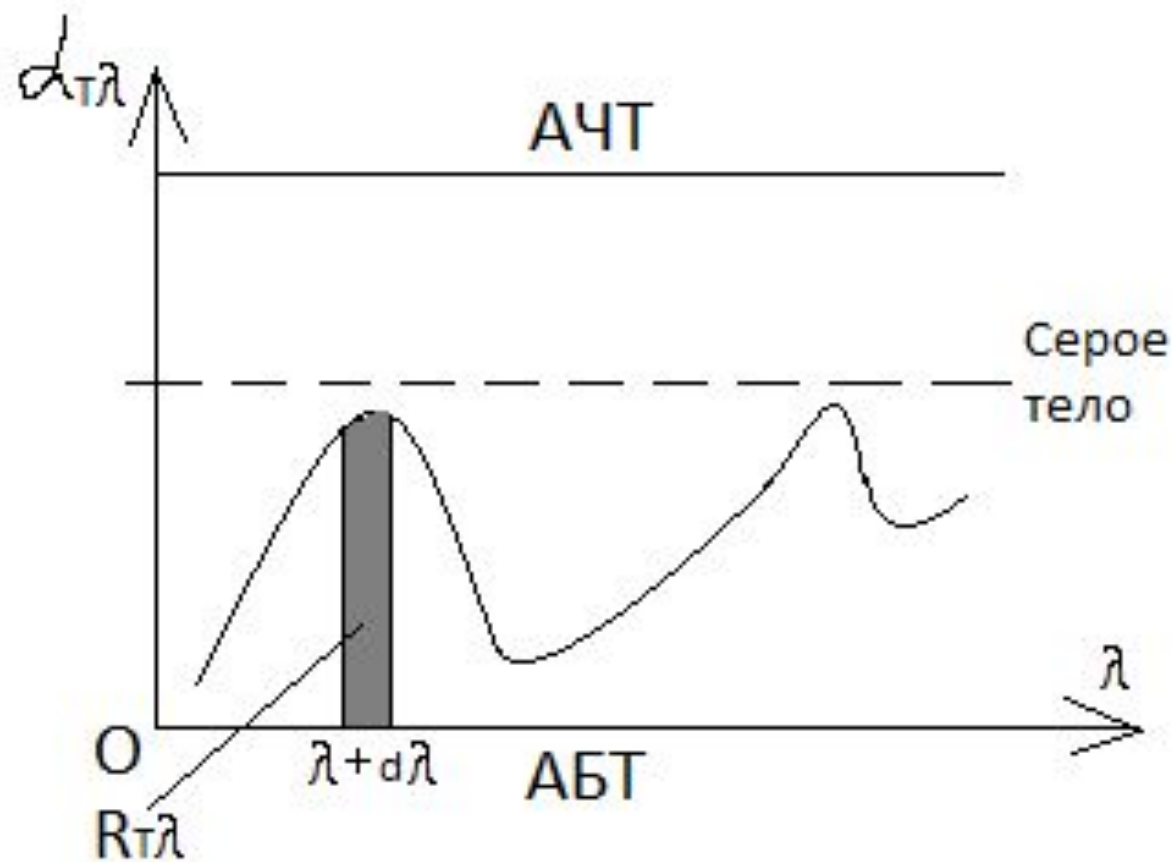
Имеется модель АЧТ. Это плоскость с маленьким отверстием величиной  $d$ .



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

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

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

## 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  $\alpha$  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  $\lambda$  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/м<sup>2</sup> с м К<sup>5</sup>- постоянная Вина

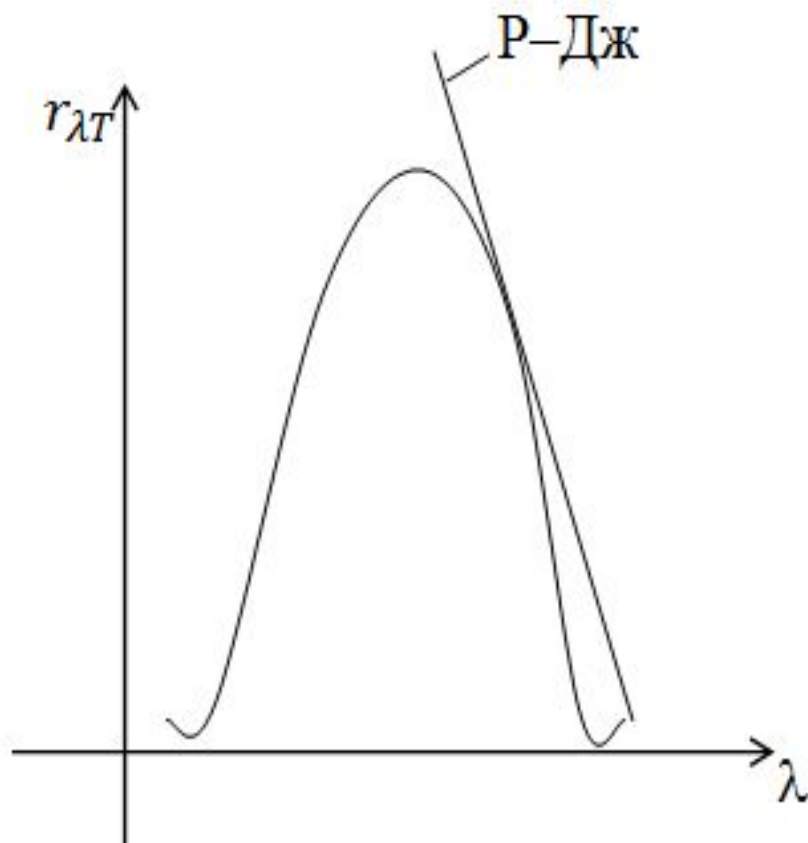
Однако все эти законы не решают задачу о распределении энергии в спектре АЧТ по длинам волн.

# 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.

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

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  $\Rightarrow$

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

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

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

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  $\lambda$   $r_{\lambda T} \rightarrow 0$ .

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.