

6 Тепловое излучение

6.1 Природа и свойства теплового излучения

Тепловое излучение представляет собой электромагнитные волны, испускаемые нагретыми телами за счет энергии теплового движения атомов и молекул.

Тепловое излучение характеризуется *непрерывным спектром* и зависит от температуры тела.

При высоких температурах ($T > 1000 \text{ K}^0$) тела в основном излучают короткие (видимые и ультрафиолетовые) волны, при низких температурах – длинные (инфракрасные - ИК).

Тепловое излучение является
единственным видом излучения, которое
может находиться в *равновесии с*
излучающими телами.

В равновесном состоянии тело в
единицу времени поглощает столько же
энергии, сколько излучает, поэтому
температура равновесного теплового
излучения равна температуре находящихся с
ним в равновесии тел.

6.2 *Характеристики теплового излучения*

Интенсивность теплового излучения описывается *поток излучения* Φ , который равен количеству энергии, излучаемому телом в единицу времени.

Размерность потока совпадает с размерностью мощности и измеряется в ваттах (**Вт**).

Поток излучения, испускаемый с единицы поверхности тела по всем направлениям в пределах телесного угла 2π (то есть в одну сторону), называется *энергетической светимостью* R , которая измеряется в единицах **Вт/м²**.

Тепловое излучение состоит из волн с различными длинами. В узком интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ энергетическая светимость пропорциональна ширине этого интервала:

$$dR = r_\lambda \cdot d\lambda \quad (6.1)$$

Коэффициент пропорциональности r_λ называется *спектральной плотностью энергетической светимости*.

Она равна мощности излучения с единицы поверхности тела в единичном интервале длин волн

$$r_\lambda = dR/d\lambda \quad (6.2)$$

Спектральная плотность энергетической светимости измеряется в единицах Вт/м^2 .

Зависимость r_λ от длины волны называется *спектром излучения* тела.

Используют также спектральную плотность энергетической светимости как функцию от частоты ν

$$r_\nu = dR/d\nu = (dR/d\lambda)(d\lambda/d\nu) = r_\lambda c/\nu^2 = r_\lambda \lambda^2/c$$

Знак минус в производной опущен.

Если спектр излучения известен, то можно найти энергетическую светимость тела:

$$R = \int_0^{\infty} r_\lambda d\lambda \quad (6.3)$$

Способность тела поглощать излучение характеризуется *коэффициентом поглощения* α , равным отношению потока излучения, поглощенного телом, к потоку излучения, упавшего на него:

$$\alpha = \Phi_{\text{погл}} / \Phi_{\text{пад}} \quad (6.4)$$

Коэффициент поглощения величина безразмерная. Для потоков монохроматического излучения с заданной длиной волны $\Phi(\lambda)$, можно определить *монохроматический коэффициент поглощения*:

$$\alpha_{\lambda} = \Phi_{\text{погл}}(\lambda) / \Phi_{\text{пад}}(\lambda) \quad (6.5)$$

Коэффициенты поглощения α и α_λ принимают значения от 0 до 1 в зависимости от природы тела.

Модельное тело, которое при любой температуре полностью поглощает падающее на него излучение с любой длиной волны, называется *абсолютно черным телом*.

Коэффициент поглощения абсолютно черного тела при любых длинах волн и температурах равен единице

$$\alpha_\lambda^{Ачт} = 1$$

Абсолютно черное тело поглощает все падающее на него излучение.

Излучение абсолютно черного тела зависит только от его температуры.

6.3 Закон Кирхгофа

Тепловое излучение является *равновесным процессом*, поэтому оно должно подчиняться законам термодинамики. Из условий равновесия вытекает связь между величинами α_λ и r_λ .

Для ее нахождения рассмотрим замкнутую полость, внутри которой находятся различные тела. Пусть температура полости поддерживается постоянной термостатом, а тела обмениваются энергией между собой и с полостью только путем испускания и поглощения электромагнитного излучения.

Через некоторое время система придет в состояние термодинамического равновесия и все тела примут температуру оболочки.

Это значит, что каждое тело независимо от своей формы и состава излучает и поглощает одинаковую энергию при любой длине волны.

Отсюда следует, что отношение спектральной плотности энергетической светимости к монохроматическому коэффициенту поглощения одинаково для любых тел и является универсальной функцией длины волны и температуры (*закон Кирхгофа*) :

$$r_{\lambda}/\alpha_{\lambda} = f(\lambda, T) \quad (6.6)$$

Закон **Кирхгофа** справедлив для всех тел, в том числе и для абсолютно черного тела, для которого $\alpha_{\lambda}^{A_{чт}} = 1$.

Поэтому функция **Кирхгофа** $f(\lambda, T)$ равна спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$f(\lambda, T) = r_{\lambda}^{A_{чт}} \quad (6.7)$$

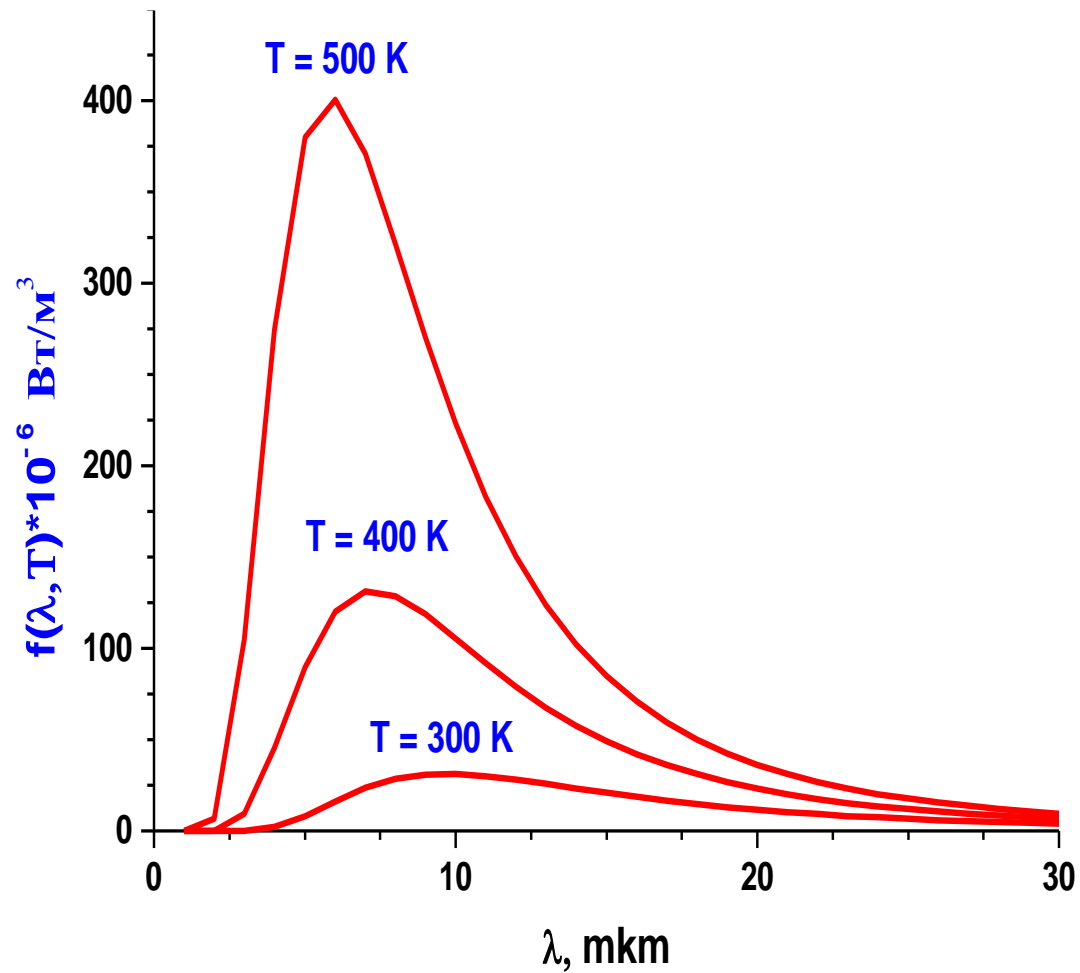
Из формул (6.6) и (6.7) получаем :

$$r_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \cdot r_{\lambda}^{A_{чт}} \quad (6.8)$$

Поскольку $\alpha_\lambda < 1$, то спектральная плотность энергетической светимости любого тела меньше спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре, значит

абсолютно черное тело при прочих равных условиях является наиболее интенсивным источником теплового излучения.

Из формулы (6.8) следует, что если тело не поглощает при какой-то длине волны $\alpha_\lambda = 0$, то оно при этой же длине волны и не излучает $r_\lambda = 0$.



Спектр излучения абсолютно черного тела. Максимум $f(\lambda, T)$ смещается в сторону коротких волн с повышением температуры. Площадь под кривой $f(\lambda, T)$ дает энергетическую светимость абсолютно черного тела $R^{Aчт}$.

6.4 Классическая формула излучения

В 1900-1905 г. Релей и Джинс на основе классической теории получили функцию Кирхгофа $f(\lambda, T)$. Они рассматривали АЧТ как полость, состоящую из гармонических осцилляторов, имеющих среднюю энергию

$$\langle \varepsilon \rangle_{\text{кл}} = kT$$

Число осцилляторов, приходящихся на единичный интервал длин волн и единицу объема излучающей, замкнутой полости равно $4\pi/\lambda^4$.

Осцилляторы испускают электромагнитные волны с двумя взаимно перпендикулярными направлениями поляризации, поэтому плотность энергии излучения надо удвоить и она будет равна $\langle \varepsilon \rangle_{\text{кл}} 8\pi/\lambda^4$.

Если умножить эту величину на скорость света, то получим поток излучения, распространяющийся в направлении, перпендикулярном к поверхности полости

$$\langle \varepsilon \rangle_{\text{кл}} 8\pi c / \lambda^4$$

В действительности, излучение идет *под разными углами во всех направлениях* в пределах телесного угла 2π . Усреднение по направлениям уменьшает поток излучения в **4** раза и он становится равным

$$\langle \varepsilon \rangle_{\text{кл}} 2\pi c / \lambda^4$$

Полученная величина и является спектральной плотностью энергетической светимости **АЧТ**, а поэтому и функцией **Кирхгофа**

формула Релея-Джинса $f_{\text{кл}}(\lambda, T) = 2\pi c k T / \lambda^4 \quad (6.9)$

Из формулы Релея-Джинса (6.9) следует, что для очень коротких волн АЧТ должно излучать неограниченную энергию, вся излучаемая им энергия тоже будет бесконечной.

Однако, это противоречит эксперименту — *ультрафиолетовая катастрофа.*

6.5 Квантовая теория излучения

Анализируя накопленные результаты по излучению АЧТ, Планк в 1900 г. пришел к выводу, что для объяснения экспериментальной кривой $f(\lambda, T)$ необходимо считать, что электромагнитное излучение испускается и поглощается не непрерывно, а дискретными порциями (квантами или фотонами). Минимальная энергия одного кванта равна

$$\varepsilon = h\nu$$

Энергии других порций излучения ε_n кратны этой величине:

$$\varepsilon_n = nh\nu, \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек – *постоянная Планка*

Состояния осцилляторов с разными энергиями реализуются с разными вероятностями. В равновесном состоянии вероятности осцилляторов подчиняются распределению **Больцмана**:

$$P_n = \frac{\exp(-\varepsilon_n / kT)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp(-\varepsilon_n / kT)}$$

Поэтому среднее значение энергии одного колебания равно:

$$\langle \varepsilon \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} P_n \varepsilon_n$$

Суммируя геометрическую прогрессию, получаем :

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (6.10)$$

В пределе $h \rightarrow 0$ средняя энергия квантового осциллятора (6.10) переходит в среднюю энергию классического осциллятора $\langle \varepsilon \rangle_{\text{кл}} = kT$.

Умножая (6.10) на прежнее число осцилляторов $2\pi c/\lambda^4$ и выражая частоту ν через длину волны, получаем функцию Кирхгофа в виде

формула Планка

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)} \quad (6.11)$$

В пределе длинных волн эта формула переходит в формулу Релея-Джинса.

6.6 *Законы излучения абсолютно черного тела*

Из формулы **Планка** следуют законы, которые были установлены в экспериментальных исследованиях.

Найдем максимум функции **Кирхгофа** $f(\lambda, T)$.
Из условия экстремума функции

$$\frac{\partial f(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0$$

получается трансцендентное уравнение

$$e^x = \frac{5}{5 - x} \quad x = \frac{hc}{\lambda kT}$$

решением которого является $x_{max} \cong 4.965$

Отсюда находим связь между температурой и длиной волны, соответствующей максимуму спектральной плотности

закон смещения Вина $\lambda_{max} = b/T$ (6.12)

$$b = \frac{hc}{4.965k} \approx 2.8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} \quad \text{- постоянная Вина.}$$

Из (6.12) следует, что максимум излучения АЧТ с ростом температуры сдвигается в сторону коротких волн. Поэтому при нагревании тел их цвет меняется от темно-красного до голубого.

В частности, из максимума спектра излучения Солнца ($\lambda_{max} = 0.48$ мкм) следует, что температура его поверхности составляет $\sim 6000^\circ$ К.

Используя функцию Планка по формуле (6.3) можно вычислить энергетическую светимость абсолютно черного тела. Результатом является закон Стефана-Больцмана

$$R^{Aчт} = \sigma T^4 \quad (6.13)$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \approx 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \quad \text{постоянная Стефана-Больцмана.}$$

Таким образом, энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Поэтому чем *сильнее нагрет источник, тем интенсивнее он излучает.*