

Тема: Тепловое излучение

Тепловым называется электромагнитное излучение, обусловленное тепловым движением атомов и молекул вещества (то есть его внутренней энергией) и зависящее только от температуры и оптических свойств вещества.

Все тела при температуре выше абсолютного нуля $T = 0\text{К}$, излучают тепловую энергию.

Всякое тело, излучая само, вместе с тем поглощает часть лучистой энергии, испускаемой другими телами. Этот процесс называется **лучепоглощением**.

Коэффициентом поглощения $\alpha_{\nu,T}$ называется скалярная величина, равная отношению падающей на тело энергии $W_{\text{падающая}}$ за какой-то промежуток времени, к величине поглощённой энергии $W_{\text{поглощённая}}$ за тот же промежуток времени:

$$\alpha_{\nu,T} = \frac{W_{\text{поглощённая}}}{W_{\text{падающая}}},$$

$$[\alpha_{\nu,T}] = \text{безразмерная}.$$

По оптическим свойствам все тела делятся на:

- абсолютно чёрные тела (АЧТ),
- серые тела (СТ),
- реальные тела (РТ).

***Абсолютно чёрным телом** называется тело, которое при любой температуре поглощает всё падающее на него тепловое излучение.*

Для абсолютно чёрного тела коэффициент поглощения $\alpha_{\nu, T} = 1$.

***Серым телом** называется тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы $\alpha_{\nu, T} < 1$, но одинаков для всех частот при данной температуре.*

(при разных температурах T , коэффициент поглощения серого тела $\alpha_{\nu, T}$ в общем случае может быть различным).

***Реальным телом** называется тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы $\alpha_{\nu, T} < 1$, но зависит от частоты ν и температуры тела T .*

Состояние термодинамического равновесия

Испуская энергию и одновременно поглощая, тело может прийти в состояние теплового равновесия, когда его температура уже не изменяется.

Температура, соответствующая этому состоянию, называется *температурой лучистого равновесия*.

Термодинамическим равновесием системы называется такое состояние системы, при котором любое тело системы излучает ровно столько тепловой энергии, сколько его поглощает за одно и то же время.

При термодинамическом равновесии все тела системы имеют одну и ту же температуру T .

Это выравнивание температуры происходит автоматически: каждое тело за одно и то же время поглощает такое же количество теплоты, сколько его и излучает за тот же промежуток времени.

Основные характеристики теплового излучения

Для количественной оценки процессов лучеиспускания и лучепоглощения вводятся следующие характеристики:

- **спектральная плотность энергетической светимости** (или **спектральная лучеиспускательная способность тела**) $r_{\lambda,T}$ (или $r_{\nu,T}$) – скалярная величина, равная отношению энергии dW , которую излучает поверхность тела площадью dS за время dt в интервале длин волн $d\lambda$ (или частот $d\nu$).

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW}{dS \cdot dt \cdot d\lambda}, \quad [r_{\lambda,T}] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^3} \equiv \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

или

$$r_{\nu,T} = \frac{dW}{dS \cdot dt \cdot d\nu}, \quad [r_{\nu,T}] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{1}{\text{с}}} \equiv \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}.$$

- **энергетическая светимость** (или **интегральная лучеиспускательная способность тела**) R_T – скалярная величина, равная отношению энергии dW , которую излучает поверхность тела площадью dS за время dt во всём интервале длин волн $0 < \lambda < \infty$ (или частот $0 < \nu < \infty$):

$$R_T = \frac{dW}{dS \cdot dt}, \quad [R_T] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \equiv \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Причём:

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

Модель абсолютно чёрного тела

Абсолютно чёрных тел в природе не существует. Однако, модель такого тела создать можно (рис.1).

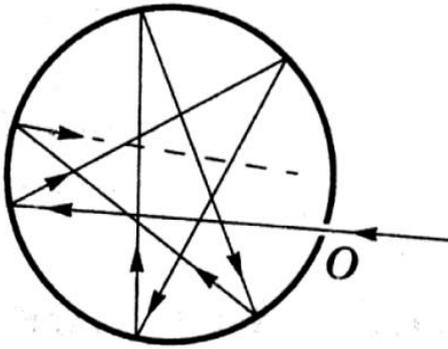


Рис. 1

Если взять твёрдую замкнутую оболочку, зачернённую с внутренней стороны и имеющую маленькое входное отверстие, то полость этой оболочки будет вести себя как абсолютно чёрное тело.

Любое тепловое излучение, попавшее вовнутрь этой оболочки, будет испытывать многократные отражения от её стенок, пока полностью поглотится.

Если же такую оболочку окружить теплоизолирующими стенками и нагреть, то из отверстия этой оболочки будет выходить излучение подобное излучению абсолютно чёрного тела.

Разлагая это излучение в спектр, и, измеряя интенсивность различных участков спектра, можно экспериментально получить *кривые теплового излучения абсолютно чёрного тела*.

Результаты таких исследований показаны на рис 2.

Кривые теплового излучения абсолютно чёрного тела при различных температурах

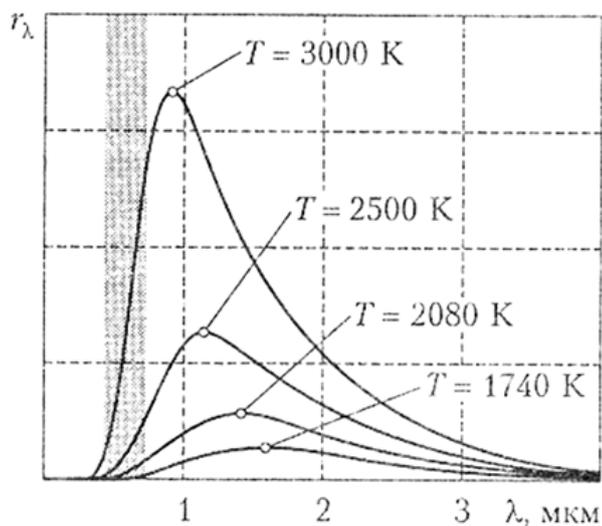


Рис. 2

Анализ этих кривых показывает, что:

- тепловое излучение абсолютно чёрного тела имеет сплошной спектр,
- с увеличением температуры тела максимум интенсивности излучения смещается в сторону меньших длин волн (или в сторону больших частот),
- с увеличением температуры резко возрастает максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости тела.

Площадь под любой кривой теплового излучения равна энергетической светимости абсолютно чёрного тела R_T при данной температуре.

Законы теплового излучения

Закон Кирхгофа (1859 г) для теплового излучения реальных тел

Отношение излучательной способности любого тела $r_{\nu, T}$ к его поглотительной способности $\alpha_{\nu, T}$ при данной температуре T не зависит от природы тела и является для всех тел универсальной функцией длины волны и температуры, равной излучательной способности абсолютно чёрного тела $r_{\nu, T}^{AЧТ}$, т.е.

$$\frac{r_{\nu, T}}{\alpha_{\nu, T}} = r_{\nu, T}^{AЧТ} .$$

Из закона Кирхгофа следует, что:

- тепловое излучение реальных тел не может превышать тепловое излучение абсолютно чёрного тела,
- тело, которое сильнее поглощает тепловое излучение в каком-либо интервале частот $d\nu$ (или длин волн $d\lambda$), будет сильнее в этом же интервале частот $d\nu$ (или длин волн $d\lambda$) и излучать,
- если два тела при одной и той же температуре T поглощают разное количество тепловой энергии, то и излучение этих тел при этой же температуре должно быть различным.

Закон Стефана-Больцмана для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Экспериментально зависимость энергетической светимости R_T абсолютно чёрного тела от его абсолютной температуры T была установлена Стефаном (1879 г), а теоретически - Больцманом (1884 г).

Закон Стефана-Больцмана:

энергетическая светимость абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

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

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ - постоянная Стефана-Больцмана,

T - абсолютная температура тела, K .

Закон Стефана-Больцмана не даёт ответа относительно распределения энергии излучения абсолютно чёрного тела по спектру.

Законы Вина для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Вин в 1893 году, применяя электромагнитную теорию Максвелла к проблеме теплового излучения абсолютно чёрного тела, получил следующие законы.

Закон смещения Вина

Длина волны λ_{\max} , на которую приходится максимум теплового излучения абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре T :

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

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

T - абсолютная температура тела, К .

Наглядным примером, подтверждающим изменение длины волны λ_{\max} , на которую приходится максимум теплового излучения тела с ростом его температуры, является постепенное изменение цвета свечения нагреваемого металла от красного при невысоких температурах, до белого при увеличении его температуры.

Второй закон Вина

Величина максимального значения спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела $r_{\lambda,T}^{\max}$ прямо пропорциональна пятой степени его абсолютной температуры T :

$$r_{\lambda,T}^{\max} = CT^5,$$

где $C = 1,30 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$ - постоянная Вина,

T - абсолютная температура тела, К .

Закон Рэля-Джинса для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Вид функции Кирхгофа $r_{\nu, T}^{AЧТ}$ пытались определить многие учёные, например, Рэлей (1900 г) и Джинс (1909 г), которые исходя из теоремы классической статистической физики о равномерном распределении энергии по степеням свободы, получили следующий закон:

закон Рэля-Джинса

Спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна его абсолютной температуре

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT . \quad (3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ - постоянная Больцмана,

T – абсолютная температура тела, K .

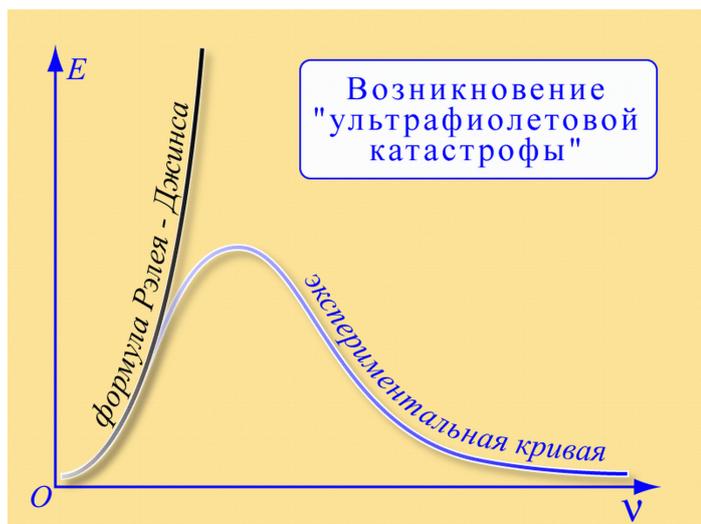


Рис. 3

Формула Рэля-Джинса даёт совпадение с кривыми теплового излучения абсолютно чёрного тела в области малых частот ν и приводит к сильному расхождению в области больших частот ν (см. рис. 3).

Такое резкое противоречие теории с экспериментом получило название «*ультрафиолетовой катастрофы*».

Закон Планка для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Попытки теоретически установить закон распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, основанные на законах классической термодинамики, не увенчались успехом. Только в 1900 году Макс Планк удалось получить вид функции $r_{\nu, T}^{AЧТ}$, который хорошо согласовывался с опытными данными во всём спектре излучения абсолютно чёрного тела.

Гипотеза Планка о тепловом излучении тел

Для получения функции $r_{\nu, T}^{AЧТ}$ Планку пришлось отказаться от классических представлений о непрерывности излучения электромагнитных волн.

Он высказал гипотезу, что электромагнитное излучение испускается в виде отдельных порций энергии ε (квантов), величина которых пропорциональна частоте излучения:

$$\varepsilon = h\nu,$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка,

ν - частота излучения, Гц.

На основе этих предположений был сформулирован **закон Планка**:

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка; ν - частота излучения, Гц;

T - абсолютная температура тела, К;

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ – скорость света в вакууме;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ - постоянная Больцмана;

$e = 2,72$ – основание натуральных логарифмов.

Формула Планка находится в полном соответствии с опытными данными. Из этой формулы получаются как следствие все законы теплового излучения.

На основе теории Планка Эйнштейн в 1905 году создал квантовую теорию внешнего фотоэффекта, а Бор в 1913 году разработал теорию строения атома.