Тепловое излучение

Тепловое излучение и люминесценция

- Тепловое излучение это испускание электромагнитных волн за счёт внутренней энергии тел.
- Все остальные виды свечения объединяются под общим названием ***<u>люминесценция</u>*** и связаны с переходами электронов в атомах из состояний с более высокими энергиями на более низкие энергетические состояния, вплоть до основного состояния.

- Тепловое излучение является единственным видом излучения, которое находится в тепловом равновесии с излучающими телами.

- Все виды люминесценции оказываются неравновесными. При фотолюминесценции свечение продолжается до тех пор, пока есть атомы, находящиеся в возбуждённом состоянии, т.е. до этого происходил процесс фотовозбуждения атомов, при котором атомы из основного состояния переходили в возбуждённое. Обычные температуры практически не влияют на этот процесс не зависимо от количества энергии, которую поглотило тело от окружающей среды.
- Таким образом, равновесным может быть только тепловое излучение.

  Только к нему могут быть применены законы термодинамики.

ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Закон Кирхгофа

Поток энергии (всех частот), испускаемый единицей поверхности излучающего тела в единицу времени во всех направлениях (в пределах телесного угла 4π ср) называется энергетической светимостью тела (R).

[R] = Вт/м2.

- Энергетическая светимость является функцией температуры. В малом интервале частот
$dR_\omega = r_\omega \cdot d\omega.$ (1)

- Величина *rω* - называется испускательной способностью тела или спектральной плотностью энергетической светимости. Это поток энергии с единицы поверхности, во всех направлениях в единичном спектральном диапазоне. *Она сильно зависит от температуры.* r_ω является функцией частоты и температуры.

- Энергетическая светимость определяется:

$$R_T = \int_0^\infty dR_{\omega T} = \int_0^\infty r_{\omega T}\, d\omega. \qquad (2)$$

- Аналогично (1) запишем

$dR_\lambda = r_\lambda \cdot d\lambda.$ (3)

Для одного и того же участка спектра должны совпадать $r_\omega \cdot d\omega = r_\lambda \cdot d\lambda$.

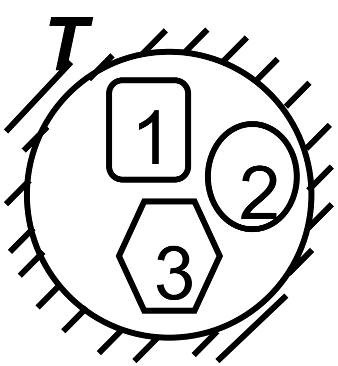
- Пусть на элементарную площадку поверхности тела падает поток лучистой энергии $d\Phi_\omega$, обусловленный электромагнитными волнами, частоты которых заключены в интервале $d\omega$. Часть этого потока $d\Phi'_\omega$ будет поглощена телом. Безразмерная величина

$$\boldsymbol{\alpha}_{\omega T} = d\Phi'_\omega / d\Phi_\omega \qquad (4)$$

называется поглощательной способностью тела. Она есть функция частоты и температуры. Она не может быть больше единицы.

- Для тела полностью поглощающего излучение всех частот $\alpha_{\omega T} = 1$. Такое тело называется ***абсолютно чёрным***. Тело, для которого $\alpha_{\omega T} = \alpha_T = const < 1$, *называют* ***серым***.

- Мысленно проведём эксперимент.



Обмен энергией может происходить только за счёт излучения. Температура внутри оболочки поддерживается постоянной и равной ***T.***

- В таком состоянии тело, обладающее большей испускательной способностью, теряет в единицу времени больше энергии, но T = const, следовательно, это тело должно обладать большей поглощательной способностью.

$$\left(\frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}}\right)_3 = \ldots. \qquad (5)$$

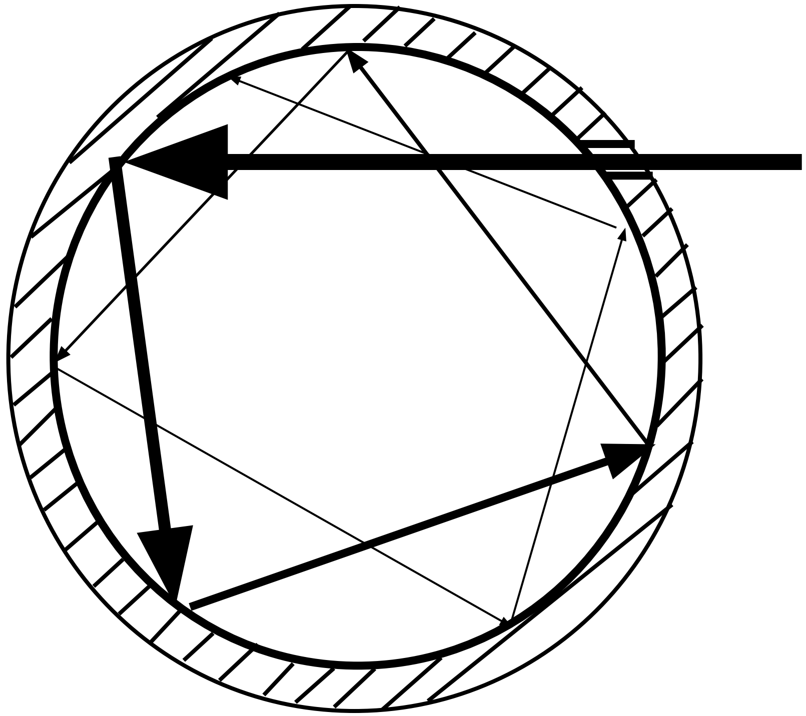
- ***Отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры.***

$$\frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}} = f(\omega, T). \qquad (6)$$

- Для абсолютно чёрного тела $\alpha_{\omega T}$ =1, следовательно, для него $r_{\omega T} = f(\omega, T)$, т.е. универсальная функция Кирхгофа есть испускательная способность абсолютно чёрного тела.

- Абсолютно чёрных тел в природе не существует, это идеализация.

- Полость с малым отверстием очень близка по своим свойствам к абсолютно чёрному телу.



Разлагая это излучение в спектр можно найти экспериментальный вид функции *f(ω,T)*.

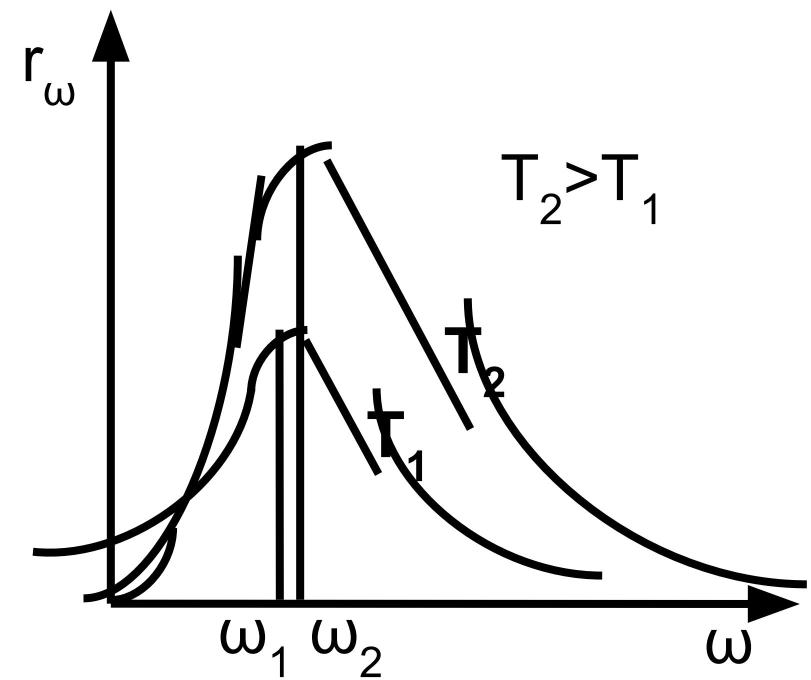


Рис.1.

Закон Стефана-Больцмана

- Площадь под кривой $r_{\omega T} = f(\omega)$ даёт энергетическую светимость.

$$R = \int_0^\infty f(\omega, T)\,d\omega = \sigma T^4, \qquad (1)$$

т.е. $R = \boldsymbol{\sigma} T^4$ – закон Стефана-Больцмана,
а $\boldsymbol{\sigma} = 5{,}7 \cdot 10\text{-}8$ *Вт* $\cdot$ *м*$^{-2}$ $\cdot$ *К*$^{-4}$ – *постоянная Стефана-Больцмана.*

Закон смещения Вина

$$r_{\nu,T} = C_1 \nu^3 e^{-C_2 \cdot \nu / T}, \qquad (1)$$

где $C1$ и $C2$ – постоянные, которые Вин не расшифровал.

- Выражение (1) имеет максимум. Вин нашёл зависимость $\boldsymbol{\nu}_m = f(T)$, где $\boldsymbol{\nu}_m$ – частота, соответствующая максимальному значению $r_{\nu T}$ *абсолютно чёрного тела.* Найдём максимум функции (1). Найдём производную по $\boldsymbol{\nu}$.

$$\frac{dr_{\nu,T}}{d\nu} = C_1 \cdot 3 \cdot \nu_m^2 e^{-\frac{C_2}{T}\nu_m} + C_1 \cdot \nu_m^3 e^{-\frac{C_2}{T}\nu_m}\left(-\frac{C_2}{T}\right) =$$

$$= 3C_1\nu_m^2 e^{-\frac{C_2}{T}\nu_m} - \frac{C_1C_2}{T}\nu_m^3 e^{-\frac{C_2}{T}\nu_m} = 0$$

Сокращая $\boldsymbol{\nu_m}$, $\boldsymbol{C_1}$ и экспоненту получим

$\frac{\nu_m}{T} = \frac{3}{C_2} = b_1$, или $\frac{\nu_m}{T} = b_1$.

Чаще записывают так $\lambda_m = \frac{b}{T}$, (2)

где b = 2,9 · 10-3 м · К.

(Получено экспериментально). Выражение (2) и есть закон смещения Вина.

Формула Рэлея-Джинса

- Рэлей и Джинс сделали попытку определить равновесную плотность излучения абсолютно чёрного тела из теоремы классической статистики о равномерном распределении энергии по степеням свободы. На каждую степень свободы приходится в среднем ***kT***. В результате они получили:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{C^2}kT, \tag{1}$$

где *C* – скорость света в вакууме.

- Из неё видно, что $r_{\nu,T}$ *монотонно возрастает с ростом* ν^2, а экспериментальная кривая имеет максимум.

- Попытка получить из (1) закон Стефана-Больцмана приводит к абсурду.

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

когда $R \sim T^4$.

Формула Планка

Больцман указал на вероятностный смысл энтропии. ($S = k\ln\Omega$).

Термодинамическая вероятность (Ω) – это число возможных микроскопических комбинаций, совместимых с данным состоянием в целом.

В данном случае это число возможных способов распределения энергии между осцилляторами. Такой процесс подсчёта возможен, если энергия будет принимать не любые непрерывные значения, а лишь дискретные значения, кратные некоторой единичной энергии.

$E_n = n \cdot h\nu$, где n = 1, 2, 3….

•Минимальна порция энергии ***E* = *hν*** = $\hbar\boldsymbol{\omega}$.
ω* =2*πν и $\hbar$ =***h*/2*π*.**
h = 6,62·*10-34 Дж·с,* $\hbar$ = 1,05·*10-34 Дж·с.*

•Эти величины называются еще квантами действия. То, что ***E* = *hν*** нельзя ниоткуда вывести гениальная догадка М.Планка.

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{C^2}\cdot\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \qquad (1)$$

$$r_{\lambda,T} = \frac{4\pi^2\hbar C^2}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{e^{\frac{2\pi\hbar C}{kT\lambda}} - 1}. \qquad (2)$$

$$r_{\omega,T} = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 C^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}. \qquad (3)$$

•В области малых частот, т.е. при *hv<<kT*, *exp(hv/kT)* = 1 + *hv/kT* + … *и поэтому в формуле (1) exp(hv/kT)*- 1 = *hv/kT*, отсюда получается формула Рэлея-Джинса.

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{C^2} kT. \qquad (4)$$

•В области больших частот *h**v**>>kT единицей в знаменателе можно пренебречь, и получается формула Вина.*

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{C^2}\cdot \square^{-\frac{h\nu}{kT}}. \qquad (5)$$

- Из формулы Планка можно получить закон Стефана-Больцмана и закон смещения Вина.

$$R = \int_0^\infty r_{\omega,T}\,d\omega = \int_0^\infty \frac{\square\omega^3}{4\pi^2 C^2}\cdot\frac{d\omega}{\square^{\frac{\square\omega}{kT}}-1}. \qquad (6)$$

- Введём вместо переменной ***ω*** *безразмерную переменную* ***x* = □*ω/kT***. Тогда ***ω*** = ***(kT/*□*)·x, dω* = *(kT/*□*)·dx.***

$$R=\frac{\hbar}{4\pi^2C^2}\int_0^\infty\frac{\left(\frac{kT}{\hbar}\right)^3x^3\frac{kT}{\hbar}dx}{e^x-1}=\frac{\hbar}{4\pi^2C^2}\cdot\left(\frac{kT}{\hbar}\right)^4\int_0^\infty\frac{x^3dx}{e^x-1}=\frac{\pi^2k^4}{60\cdot C^2\hbar^3}\cdot T^4=\sigma\cdot T^4.$$

- Определённый интеграл в последнем выражении может быть вычислен и равен *$\pi^4/15$*. Расчёт постоянной Стефана-Больцмана даёт значение ***σ*** =5,6696 $\cdot$ *10^{-8} Вт/(м$^2\cdot$К^4), что хорошо согласуется с экспериментальным значением*.

- Найдём значение постоянной в законе смещения Вина. Продифференцируем функцию (2) по ***λ*** *и приравняем полученное выражение нулю.*

$$\frac{dr_{\lambda,T}}{d\lambda} = \frac{4\pi^2 \boxtimes C^2 \left[\left(\frac{2\pi \boxtimes C}{kT\lambda} \right) \boxtimes^{\frac{2\pi \boxtimes C}{kT\lambda}} - 5 \left(\boxtimes^{\frac{2\pi \boxtimes C}{kT\lambda}} - 1 \right) \right]}{\lambda^6 \left(\boxtimes^{\frac{2\pi \boxtimes C}{kT\lambda}} - 1 \right)^2} = 0$$

- Значение $\boldsymbol{\lambda}_m$, при котором функция достигает максимума и обращает в нуль это выражение, стоящее в числителе в скобках. Обозначив **2π□$C/kT\lambda_m = x$**, получим уравнение

$$x\boxtimes^{x} - 5\left(\boxtimes^{x} - 1\right) = 0.$$

- Решение этого трансцендентного уравнения даёт ***x*** =4,965.
  Следовательно, ***2π□C/kTλ$_m$*** = 4,965, откуда

$$T\lambda_m = \frac{2\pi\boxtimes C}{4{,}965 \cdot k} = b = 2{,}888 \cdot 10^{-3}\, м \cdot K.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

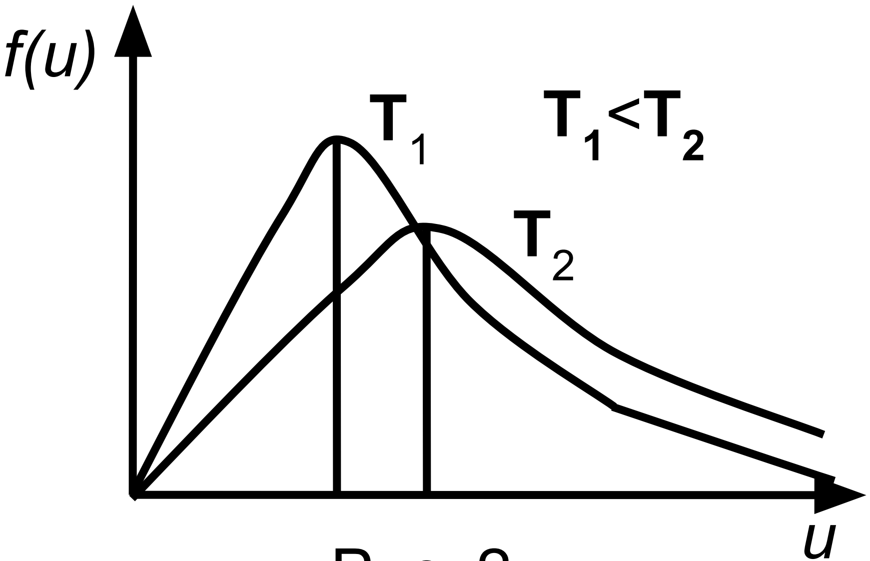


Рис. 2.

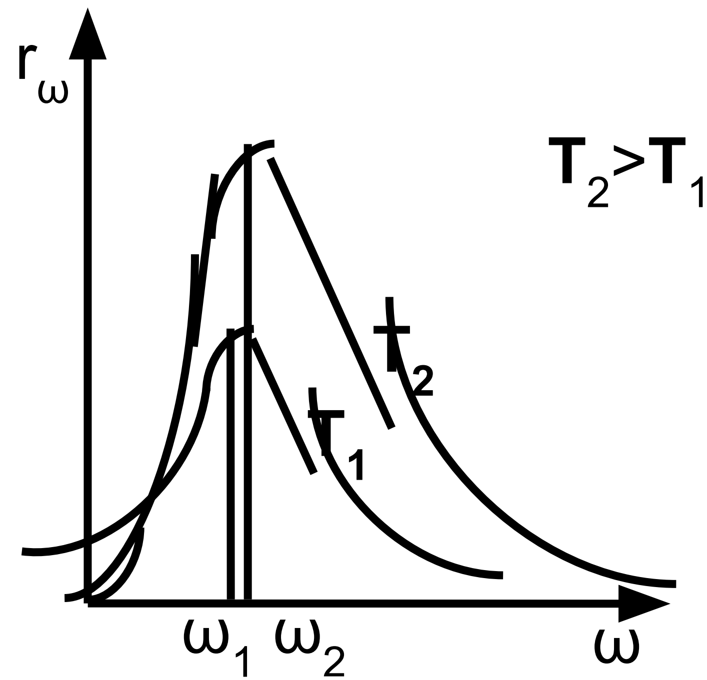


Рис. 1.