

ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ

Тепловое излучение и его характеристики

Тепловое излучение — электромагнитное излучение, возникающее за счет *внутренней энергии* излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойства тела. Тепловое излучение присуще *всем телам при температуре выше 0 К*. Оно характеризуется сплошным спектром (см. § 142). При высоких температурах излучаются короткие (видимые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны, при низких — преимущественно длинные (инфракрасные).

Тепловое излучение может находиться в термодинамическом равновесии с излучающими телами (например, в теплоизолированной системе, все тела которой находятся при одинаковой температуре).

Количественной характеристикой теплового излучения служит **спектральная плотность энергетической светимости тела** — мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины:

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{изл}}}{d\nu}, \quad (139.1)$$

где $dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{изл}}$ — энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени (мощность излучения) с единицы площади поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$. Единица спектральной плотности энергетической светимости ($R_{\nu,T}$) в СИ — *джоуль на метр в квадрате* (Дж/м²).

Формулу (139.1) можно записать в виде

$$dW_{v,v+dv}^{\text{изл}} = R_{v,T} dv = R_{\lambda,T} d\lambda. \quad (139.2)$$

Так как $c = \lambda\nu$, то

$$\frac{d\lambda}{d\nu} = -\frac{c}{\nu^2} = -\frac{\lambda^2}{c},$$

где знак « $-$ » указывает на то, что с возрастанием одной из величин (ν или λ) другая величина убывает. Поэтому в дальнейшем знак « $-$ » будем опускать. Таким образом,

$$R_{\nu,T} = \frac{\lambda^2}{c} R_{\lambda,T}. \quad (139.3)$$

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется **спектральной поглощательной способностью**

$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+dv}^{\text{погл}}}{dW_{\nu,\nu+dv}}, \quad (139.4)$$

показывающей, какая доля энергии, приносимой за единицу времени на единицу площади поверхности тела падающими на нее электромагнитными волнами с частотами от ν до $\nu + d\nu$, поглощается телом. Спектральная поглощательная способность — *величина безразмерная*.

Тело, способное полностью поглощать все падающее на него излучение всех частот, называется **черным**. **Тело**, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех частот и зависит только от температуры, называют **серым**. Спектральные поглощательные способности соответственно черного и серого тел

$$A_{\nu,T}^{\text{ч}} \equiv 1; A_{\nu,T}^{\text{с}} = A_T = \text{const} < 1.$$

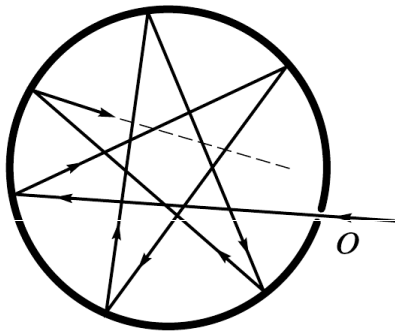


Рис. 171

Моделью черного тела может служить замкнутая полость с небольшим отверстием (рис. 171). Луч света, попавший внутрь такой полости, испытывает многократные отражения от стенок. При каждом отражении часть энергии поглощается, в результате — практически все излучение любой частоты поглощается такой полостью. Вследствие этого открытые окна домов со стороны улицы кажутся темными, хотя внутри комнат достаточно светло из-за отражения света от стен.

Черное тело — *идеализированная модель*. Таких тел в природе нет, но, например, сажа, платиновая чернь, черный бархат в определенном интервале частот по своим свойствам близки к черным телам.

Законы Кирхгофа, Стефана—Больцмана и Вина

Закон Кирхгофа. Связь между спектральными плотностями энергетической светимости ($R_{\nu,T}$) и поглощательной способностью ($A_{\nu,T}$) определяется **законом Кирхгофа** (1859): отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела; оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}. \quad (140.1)$$

Для черного тела $A_{\nu,T}^{\text{ч}} \equiv 1$, поэтому из закона Кирхгофа [см. (140.1)] следует, что $R_{\nu,T}$ для черного тела равна $r_{\nu,T}$. Таким образом, **универсальная функция Кирхгофа** $r_{\nu,T}$ есть не что иное, как **спектральная плотность энергетической светимости черного тела**.

Из закона Кирхгофа следует, что как бы сильно не изменялись $R_{\nu,T}$ и $A_{\nu,T}$ при переходе от одного тела к другому их отношение для всех тел одинаково, а именно, равно спектральной плотности энергетической светимости черного тела *при той же температуре и частоте*.

Закон Кирхгофа описывает только тепловое излучение, являясь настолько характерным для него, что может служить надежным критерием для определения природы излучения. Излучение, которое закону Кирхгофа не подчиняется, не является тепловым.

Закон Стефана—Больцмана. Чтобы прийти к этому закону, рассмотрим **энергетическую светимость тела** — энергию, излучаемую в единицу времени с единицы площади поверхности по всем интервалам частот (длин волн) от 0 до ∞ :

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} R_{\lambda,T} d\lambda. \quad (140.2)$$

Используя закон Кирхгофа (140.1), выражение для энергетической светимости можно записать в виде

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

Для серого тела

$$R_T^c = A_T \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = A_T R_e, \quad (140.3)$$

где

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu \quad (140.4)$$

— **энергетическая светимость черного тела** (зависит только от температуры).

Согласно закону Стефана—Больцмана (1884),

$$R_e = \sigma T^4, \quad (140.5)$$

т. е. энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры.

Постоянную σ называют **постоянной Стефана—Больцмана**: ее экспериментальное значение

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

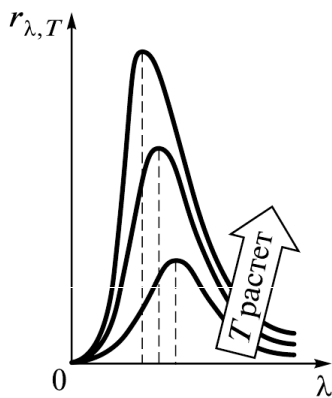
Закон смещения Вина. Закон Стефана—Больцмана, определяя зависимость R_e от температуры, не дает ответа относительно спектрального состава излучения черного тела.

Из экспериментальных кривых зависимости функции $r_{\lambda,T}$ от длины волны λ [согласно (139.3) $r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu,T}$] при различных температурах

(рис. 172) следует, что распределение энергии в спектре черного тела является неравномерным. Все кривые имеют явно выраженный максимум, который по мере повышения температуры смещается в сторону более коротких длин волн. Площадь, ограниченная кривой зависимости $r_{\lambda,T}$ от λ и осью абсцисс, пропорциональна энергетической светимости R_e черного тела и, следовательно, по закону Стефана—Больцмана, четвертой степени температуры.

Согласно закону смещения Вина,

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (140.6)$$



т. е. длина волны λ_{\max} , соответствующая **максимальному** значению спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре.

Постоянную b называют **постоянной Вина**: ее экспериментальное значение

Рис. 172

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Выражение (140.6) потому называют законом смещения Вина, что оно показывает смещение положения максимума функции $r_{\lambda,T}$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн. Закон Вина объясняет, почему при понижении температуры нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение (например, переход белого каления в красное при остывании металла).