

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Лекция 1.

Тепловое излучение и его характеристики

Тепловым излучением называется испускание электромагнитных волн нагретыми телами за счет их внутренней энергии. Тепловое излучение свойственно всем телам при температуре выше 0 К и имеет сплошной спектр частот. При этом излучение всех длин волн обусловлено колебаниями электрических зарядов, входящих в состав вещества, т.е. ионов и электронов. Колебания ионов дает излучение с низкими частотами (инфракрасное) вследствие их значительной массы. Движение электронов, входящих в состав атомов или молекул, создает высокочастотное излучение (видимое и ультрафиолетовое). Излучение сопровождается потерей энергии телом. Пополнение энергии может осуществляться различными способами. Все виды излучений, возбуждаемые за счет какого-либо вида энергии, кроме тепловой (химической реакции, освещения, электрического разряда и т.д.), объединяются под общим названием люминесценции. При тепловом излучении энергия пополняется за счет нагревания тела.

Тепловое излучение – единственный вид излучения, который является равновесным. Все другие виды излучений – неравновесные. Поясним это на примере. Пусть нагретое (излучающее) тело помещено в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой. За счет излучения температура тела уменьшается. Но тело одновременно с излучением получает обратно часть этой энергии, отражаемой от полости. В результате непрерывного обмена энергией между телом и излучением через некоторое время наступит равновесие, т.е. тело в единицу времени будет столько же поглощать энергии, сколько и излучать. При этом температура тела не будет изменяться. Допустим, что равновесие по какой-либо причине нарушено, и тело излучает в единицу времени энергии больше, чем поглощает (или наоборот). Тогда температура тела начнет понижаться (или повышаться). В результате будет уменьшаться (или возрастать) количество излучаемой в единицу времени телом энергии, пока, наконец, не установится равновесное состояние системы тело-излучение.

Пусть в полость помещено тело, содержащее фосфор. Это тело дает добавочное (к тепловому) люминесцентное излучение за счет химического процесса окисления фосфора. Люминесцентное излучение продолжается до полного окисления фосфора, причем оно не сопровождается пополнением энергии извне. Следовательно, люминесценция – неравновесное излучение.

Тепловое или равновесное излучение подчиняется определенным общим закономерностям, вытекающим из принципов термодинамики. Однако прежде чем перейти к рассмотрению законов теплового излучения, необходимо ввести его основные характеристики.

Рассмотрим основные характеристики теплового излучения.

Поток излучения Φ_e – физическая величина, равная количеству энергии, излучаемой нагретым телом со всей поверхности в единицу времени:

$$\Phi_e = \frac{dW}{dt} \quad [\text{Дж/с} = \text{Вт}]. \quad (1)$$

Энергетическая светимость (излучательность) тела R_T - энергия, излучаемая в единицу времени с единицы площади нагретого тела во всем интервале длин волн ($0 < \lambda < \infty$). Энергетическая светимость связана с потоком излучения формулой:

$$R_T = \frac{d\Phi_e}{dS} = \frac{d^2W}{dSdt} \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (2)$$

Поток излучения и энергетическая светимость – функции температуры.

Излучение нагретого тела при данной температуре T состоит из волн различной длины (или частоты), причем волны разных длин несут отличающуюся друг от друга энергию. Поэтому в различных частях спектра излучения энергия, приходящаяся на единичный интервал длин волн, различна. Следовательно, должна существовать функция распределения, отражающая зависимость энергии излучения от длины волны, около которой взят этот единичный интервал. Такой функцией является спектральная плотность энергетической светимости (излучательности) $r_{\lambda,T}$. Это величина, численно равная энергии, излучаемой нагретым телом в единицу времени с единицы площади и приходящаяся на единичный интервал длин волн, взятый около заданной длины волны.

Энергетическая светимость R_T , являющаяся интегральной характеристикой излучения, связана со спектральной плотностью энергетической светимости соотношением

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda} \quad \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \right). \quad (3)$$

Из соотношения (4.3) можно найти энергетическую светимость (формула связи между энергетической светимостью и лучеиспускательной способностью):

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (4)$$

Индекс “ T ” у R_T и $r_{\lambda,T}$ подчеркивает зависимость этих величин от температуры.

Так как длина волны и частота связаны известным соотношением $\lambda = c/\nu$, спектральные характеристики излучения можно характеризовать также и частотой. Тогда участку спектра $d\lambda$ будет соответствовать интервал частот $d\nu$.

Любое тело не только излучает, но и частично поглощает падающую на него энергию, то есть все тела способны в той или иной степени обмениваться энергией (теплообмен излучением). Спектральной характеристикой поглощения является поглощательная способность $a_{\lambda,T}$. Поглощательная способность (коэффициент поглощения) тела $a_{\lambda,T}$ – безразмерная физическая величина, показывающая, какая доля энергии, падающей в единицу времени на единицу поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$, им поглощается:

$$a_{\lambda,T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} . \quad (5)$$

Опыт показывает, что $r_{\lambda,T}$ и $a_{\lambda,T}$ твердых тел зависят не только от длины волны и температуры, но и от химического состава тела и состояния его поверхности.

По определению $a_{\lambda,T}$ не может быть больше единицы. Для тела, полностью поглощающего падающее на него излучение всех длин волн, $a_{\lambda,T} = 1$. Такое тело называется *абсолютно черным*. Для тела, полностью отражающего упавшее на него излучение всех длин волн, $a_{\lambda,T} = 0$. Такое тело называется *абсолютно белым*. Тело, для которого поглощательная способность одинакова для всех длин волн и зависит только от температуры, называют серым: $a_{\lambda,T} = a_T = \text{const}$.

В природе не существует абсолютно черных тел. Но можно найти тела, очень близкие по своим свойствам к абсолютно черным телам (сажа, черный бархат). Наиболее совершенной моделью абсолютно черного тела может служить небольшое отверстие в непрозрачной стенке замкнутой полости (рис. 1). Луч света, попадающий внутрь полости через отверстие, претерпевает многократные отражения от стенок полости, поглощается ими и практически полностью остается внутри полости.

Модель абсолютно черного тела позволяет понять, почему узкий вход в пещеру или открытые окна домов снаружи кажутся черными, хотя внутри достаточно светло. По этой же причине ворсистые ткани обладают большей поглощательной способностью, чем гладкие.

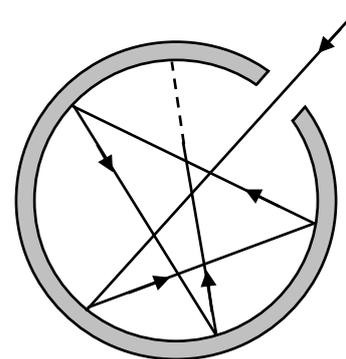


Рис. 1.
Схема модели
абсолютно черного тела

Законы теплового излучения

Между спектральной плотностью энергетической светимости и поглощательной способностью любого тела имеется связь, которая выражается соотношением:

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_{1\text{-тела}} = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_{2\text{-тела}} = \dots = r_{\lambda,T}^* . \quad (6)$$

(Здесь и далее характеристики, отмеченные звездочкой, относятся к абсолютно черному телу). Соотношение (4.6) называется *законом Кирхгофа*, а $r_{\lambda,T}^*$ - *универсальной функцией Кирхгофа*. Этот закон формулируется следующим образом: отношение спектральной плотности энергетической светимости любого тела к его поглощательной способности при данной длине волны и температуре является величиной постоянной для всех тел и равной спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела $r_{\lambda,T}^*$ при той же температуре и длине волны (так как $a_{\lambda,T}^* = 1$).

Из закона Кирхгофа следует, что чем больше тело поглощает, тем больше оно излучает энергии, то есть спектральная плотность энергетической светимости любого тела в любой области спектра всегда меньше спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при тех же значениях λ и T , так как $a_{\lambda,T} < 1$. Так, например, если раскаленную белую чашку с черным рисунком быстро достать из печи в светлой комнате, то сначала темный рисунок светится ярче белого фона. После охлаждения, когда собственное излучение чашки становится исчезающе малым, вновь становится видным темный узор на белом фоне.

Кроме того, из закона Кирхгофа следует, что если тело не поглощает электромагнитные волны какой-то частоты, то оно их и не излучает, так как при $a_{\lambda,T} = 0$, $r_{\lambda,T} = 0$.

Из закона Кирхгофа видно, что основной задачей при описании теплового излучения являлось нахождение зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры и длины волны (частоты), так как она универсальна для всех тел. Интерес представляет и зависимость энергетической светимости R_T^* от температуры.

Зависимость функции R_T^* от температуры была получена Д.Стефаном (1879 г.) из анализа экспериментальных данных, а затем Л.Больцманом (1884 г.) – теоретическим путем. Эти ученые установили, что энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна его абсолютной температуре в четвертой степени:

$$R_T^* = \sigma T^4 , \quad (7)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана (найденная экспериментально). Формула (7) носит название *закона Стефана – Больцмана*.

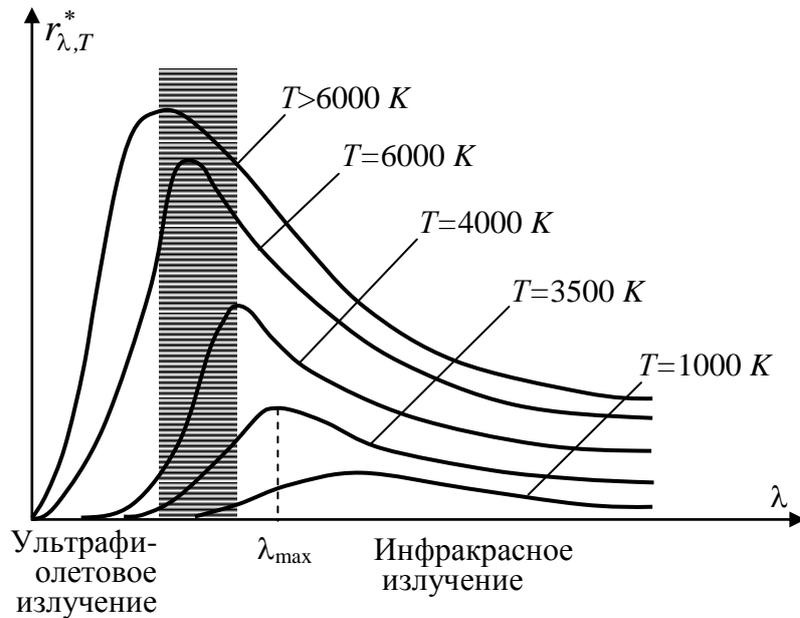


Рис. 2.
Температурная и спектральная зависимости универсальной функции Кирхгофа. Выделена область видимого излучения.

Значительно сложнее оказалась задача отыскания универсальной функции Кирхгофа, то есть зависимости $r_{\lambda,T}^*$ от длины волны и температуры. Попытка получить теоретически вид функции $r_{\lambda,T}^*$ на основе представлений классической физики не увенчалась успехом. Экспериментально же была получена система кривых (рис. 4.2), дающих распределения $r_{\lambda,T}^*$ по длинам волн при фиксированных температурах ($T = \text{const}$). Исследование хода кривых на рис. 2 устанавливает следующие закономерности.

1. Зависимость $r_{\lambda,T}^*$ от длины волны изображается непрерывной кривой, обращающейся в нуль при малых и больших длинах волн.
2. Энергия излучения абсолютно черного тела распределена по длинам волн неравномерно: кривая имеет ярко выраженный максимум.
3. По мере повышения температуры тела максимум кривой смещается в область коротких длин волн.
4. Площадь, ограниченная кривой и осью абсцисс, равна энергетической светимости абсолютно черного тела R_T^* .

Зависимость длины волны λ_{max} , соответствующей максимуму функции $r_{\lambda,T}^*$ от температуры, устанавливающая смещение λ_{max} в коротковолновый диапазон длин волн при увеличении температуры тела была установлена немецким физиком В.Вином (1893 г.) и получила название *закона смещения Вина*:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b_1}{T}, \quad (8)$$

где $b_1 = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

Закон смещения Вина, таким образом, устанавливает: длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре этого тела.

Этот закон объясняет, почему доля энергии, приходящейся на видимые лучи, возрастает, и свечение тела при нагревании переходит от красного к белому калению.

Аналитически установить вид функции $r_{\lambda,T}^*$ долгое время не удавалось. Только в 1900 году немецкий физик Макс Планк предположил, что энергия излучения испускается телом не непрерывно в виде волн, а отдельными порциями – квантами. Энергия одного кванта:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (9)$$

где ν – частота излучения, а $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – константа, получившая название постоянной Планка.

Исходя из этого предположения, М. Планк получил распределение для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (10)$$

где λ – длина волны излучения, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света в вакууме, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана. Выражение (10) получило название *формулы Планка* для функции распределения $r_{\lambda,T}^*$. Из формулы Планка можно получить все законы теплового излучения.

Выдвижением гипотезы о дискретности излучения М. Планк заложил основы квантовой теории.