**19. Тепловое излучение. Характеристики теплового излучения. Распределения энергии в спектре абсолютно черного тела (АЧТ). Формула Планка для теплового излучения.**

**Характеристики теплового излучения**

Тепловое излучение вызвано нагреванием и совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества.

Количественной характеристикой теплового излучения является **спектральная плотность энергетической светимости** (излучательности) тела – мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины:

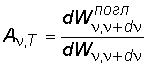
http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image002.gif,

где http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image004.gif – энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени с единицы площади поверхности тела (мощность излучения) в интервале частот *ν* до *ν+dν.*

Зная http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image006.gif, можно вычислить **интегральную энергетическую светимость (интегральную излучательность)**, просуммировав по всем частотам

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image008.gif.

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

,

которая показывает, какая доля падающей энергии электромагнитных волн с частотами от *ν* до *ν+dν* за единицу времени на единицу площади поверхности тела поглощается.

Величины http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image006.gif и http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image013.gif зависят от природы тела, его термодинамической температуры и различаются для излучений с различными частотами.

Тело, которое поглощает полностью всю падающую на него энергию, при любой температуре называется **черным** (http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image015.gif). Абсолютно черных тел в природе нет, но есть близкие к ним по своим свойствам: сажа, черный бархат, платиновая чернь и некоторые другие.

Вместе с понятием черного тела используется понятие **серого тела** – тела, поглощательная способность которого меньше единицы (http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image017.gif), но одинакова для всех частот и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела.

**Закон Кирхгофа**

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 (**закон Кирхгофа**):http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image019.gif (7.1)

Из закона Кирхгофа вытекает, что спектральная плотность энергетической светимости любого тела в любой области спектра всегда меньше спектральной плотности энергетической светимости черного тела (при одинаковых значениях *Т* и *ν*), так как http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image021.gif и поэтому http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image023.gif. Кроме того, из (7.1) видно, что если тело при данной температуре Т не поглощает электромагнитные волны в интервале частот от *ν* до *ν+dν,* то оно их в этом интервале частот при температуре *Т* и не излучает, так как http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image025.gif и http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image027.gif.

Используя формулу (7.1), выражение для энергетической светимости тела можно записать в виде:

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image029.gif.

**Закон Стефана-Больцмана и смещение Вина**

Из закона Кирхгофа (7.1) следует, что спектральная плотность энергетической светимости черного тела является универсальной функцией, поэтому нахождение явной зависимости от частоты и температуры является важной задачей теории теплового излучения.

Энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры (**Закон Стефана–Больцмана**):

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image031.gif, (7.2)

где *σ* = 5,67⋅10–8 Вт/(м2⋅К4) – постоянная Стефана–Больцмана.

Закон Стефана–Больцмана, определяя зависимость http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image033.gif от температуры, не дает ответа относительно спектрального состава излучения черного тела.

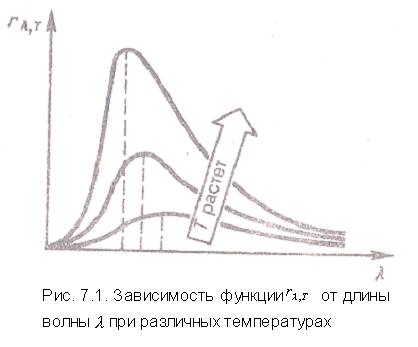
Зависимость максимума длины волны от температуры имеет вид **(закон смещения Вина**):

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image035.gif, (7.3)

где *b* = 2,9⋅10-3 м⋅К – постоянная Вина.

Из экспериментальных данных следует, что распределение энергии в спектре черного тела является неравномерным (рис. 7.1).

Закон смещения 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).



**Формулы Рэлея-Джинса и Планка**

Закон Стефана-Больцмана (7.2) и смещение Вина (7.3) не дают зависимости от температуры и частоты одновременно, только отдельно (либо от температуры, либо от частоты).

Используя методы статистической физики и закона равномерного распределения энергии по степеням свободы, выражение для спектральной плотности энергетической светимости черного тела имеет вид (**формула Рэлея-Джинса**):

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image037.gif, (7.4)

где *kТ* – средняя энергия осциллятора с собственной частотой *ν*.

Экспериментальные данные показали, что выражение (7.4) хорошо согласуется только в области достаточно малых частот и больших температур. В области больших частот формула Рэлея–Джинса резко расходится с экспериментом, а также с законом смещения Вина (рис. 7.2). Кроме того, оказалось, что получить закон Стефана–Больцмана (7.2) из формулы Рэлея-Джинса (7.4) приводит к абсурду:

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image039.gif,

в то время как по закону Стефана–Больцмана http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image033.gif пропорциональна температуре в четвертой степени. Этот результат получил название «ультрафиолетовой катастрофы». Таким образом, в рамках классической физики не удалось объяснить законы распределения энергии в спектре черного тела.

В области больших частот хорошее согласие с экспериментом дает **формула Вина (закон излучения Вина)**, полученная им из общих теоретических соображений:

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image042.gif.

Правильное, согласующееся с экспериментальными данными выражение для спектральной плотности энергетической светимости черного тела во всем интервале частот и температур было получено Планком (**формула Планка**):

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image044.gif. (7.5)

Из формулы Планка (7.5) можно получить формулу Стефана–Больцмана (7.2), смещение Вина (7.3), формулу Рэлея-Джинса (7.4).

**Применение законов теплового излучения**

Основываясь на законах температурного излучения, мы можем определять температуру раскаленных тел, которые по своим характеристикам близки к черным телам. Для сильно нагретых тел (свыше 2000 °С) измерение температуры при помощи термоэлементов, болометров и т. п. не достоверны. Поэтому единственным и надежным способом измерения температуры являются способы, основанные на законах теплового излучения. Приборы для измерения температуры нагретых тел по интенсивности их теплового излучения в оптическом диапазоне спектра называются **пирометрами**. В зависимости от того, какой закон теплового излучения используется для измерения температуры различают **радиационную, цветовую и яркостную температуры.**

**1. Радиационная температура** – температура черного тела, при которой его энергетическая светимость http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image046.gif равна энергетической светимости http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image048.gif исследуемого тела. В данном случае регистрируется энергетическая светимость тела и по закону Стефана–Больцмана вычисляется его радиационная температура:

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image050.gif.

Радиационная температура *Тр* тела всегда меньше его истинной температуры *Т*.

**2. Цветовая температура.** Распределение энергии в спектре излучения серого тела такое же, как и в спектре черного тела, имеющего ту же температуру, поэтому для серых тел применим закон смещения Вина (7.3). Зная длину волны λmax, соответствующую максимальной спектральной плотности энергетической светимости http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image052.gif исследуемого тела, можно определить его температуру

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image054.gif,

которая называется **цветовой температурой**.

**3. Яркостная температура** – температура черного тела, при которой для определения длины волны его спектральная плотность энергетической светимости равна спектральной плотности энергетической светимости исследуемого тела, т. е.:

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image056.gif, (7.6)

где *Т* – истинная температура тела.

Учитывая (7.6) по закону Кирхгофа (7.1) для исследуемого тела при длине волны λ:

http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image058.gif.

Так как для нечерных тел *А* < 1, то http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image060.gif< http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/PHIZIK/PHIZIK/METOD/OPTIKA/Suy_13_files/image062.gif, следовательно, *Тя* < *Т*, т. е. истинная температура тела всегда выше яркостной.