

Сегодня: вторник, 20 мая 2014 г.

Квантовая оптика

**Степанова Екатерина Николаевна
доцент кафедры ОФ ФТИ ТПУ**

Тема 7. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

7.1. Тепловое излучение и люминесценция

7.2. Закон Кирхгофа

7.3. Закон Стефана-Больцмана

7.4. Закон смещения Вина

7.5. Формула Рэлея-Джинса

7.6. Теория Планка

7.1. Люминесценция и тепловое излучение

Тепловое излучение — электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии (обусловленное его нагреванием).

Все другие виды свечения (излучения света), возбуждаемые за счет любого другого вида энергии, кроме теплового, называются **люминесценцией**:

- **хемилюминесценция** - окисляющийся в воздухе фосфор, гнилушки, светлячки (свечение за счет энергии химической реакции окисления)
- **электролюминесценция** (свечение при протекании тока в газе, жидкости или в твердых телах)
- **фотолюминесценция** (свечение под действием света)

Тепловое излучение - единственный вид излучения, которое может находиться в равновесии с излучающими телами.

Тепловое излучение

Это самый распространенный и простой вид излучения.

Тепловыми источниками излучения являются:



Солнце



Пламя



Лампа накаливания

Хемилюминесценция

При некоторых химических реакциях, идущих с выделением энергии, часть этой энергии непосредственно расходуется на излучение света, причем источник света остается холодным.



Светлячок



Кусок дерева,
пронизанный
светящейся грибницей



Рыба,
обитающая
на большой
глубине

Электролюминесценция

Это явление наблюдается при разряде в газах, при котором возбужденные атомы отдают энергию в виде световых волн. Благодаря этому разряд в газе сопровождается свечением.



Северное сияние



Рекламные надписи

Фотолюминесценция

Под действием падающего излучения, атомы вещества возбуждаются и после этого тела высвечиваются.



Лампа дневного света



Елочные игрушки
покрывают светящими
красками

7.2. Закон Кирхгофа

Энергетическая светимость тела (R) - поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела в единицу времени во всех направлениях (в пределах телесного угла 4π).

$$R = \Phi / S. \quad [R] = \text{Вт/м}^2$$

Излучение состоит из волн различной частоты (ν). Обозначим поток энергии, испускаемой единицей поверхности тела в интервале частот от ν до $(\nu + d\nu)$, через dR_{ν} . Тогда при данной температуре

$$dR_{\nu,T} = r_{\nu,T} d\nu$$

r_{ν} - **спектральная плотность** энергетической светимости (**лучеиспускательная способность тела**). Характеризует спектральный состав излучения.

$$[r_{\nu,T}] = \text{Дж/м}^2$$

Таким образом, $r_{\nu, T}$ - есть функция ν и T ,

а, соответственно, и $R_{\nu, T} = f(\nu, T)$

Тогда энергетическая светимость: $R_T = \int_0^{\infty} dR_{\nu, T} = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu$

$$\alpha_{\nu, T} = 1 \quad \text{или} \quad R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda$$

Поглощательная способность тела: $\alpha_{\nu, T} = \frac{d\Phi'_{\nu}}{d\Phi_{\nu}}$

$d\Phi_{\nu}$ - падающий поток лучистой энергии;

$d\Phi'_{\nu}$ - поглощенный поток лучистой энергии

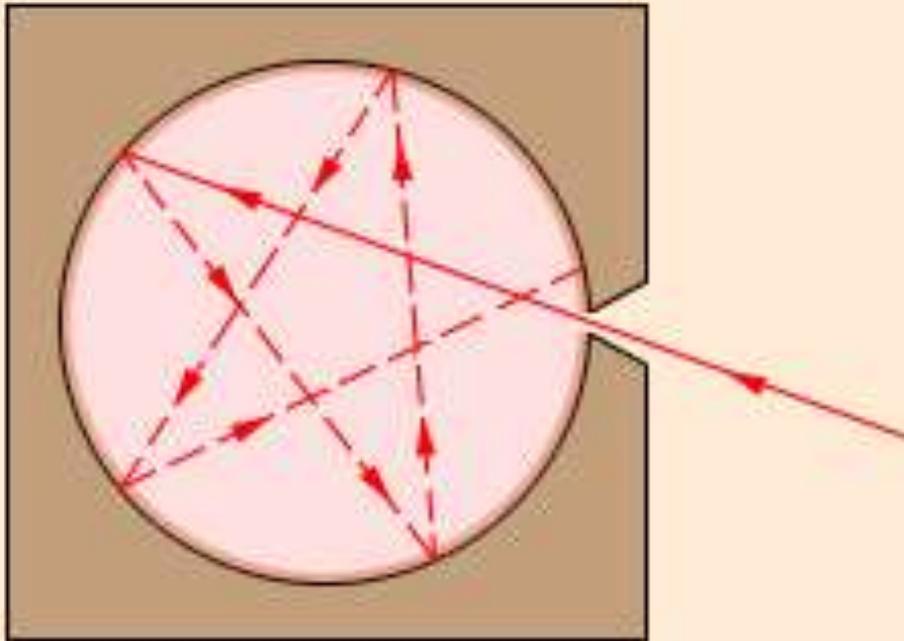
По определению $\alpha_{\nu,T}$ не может быть больше единицы.

- Тело, у которого $\alpha_{\nu,T}$ меньше единицы и одинакова по всему диапазону частот, называют *серым телом*.
- Тело, для которого $\alpha_{\nu,T}$ равно единице - абсолютно *черное тело*.
- Реальное тело всегда отражает часть энергии падающего на него излучения.

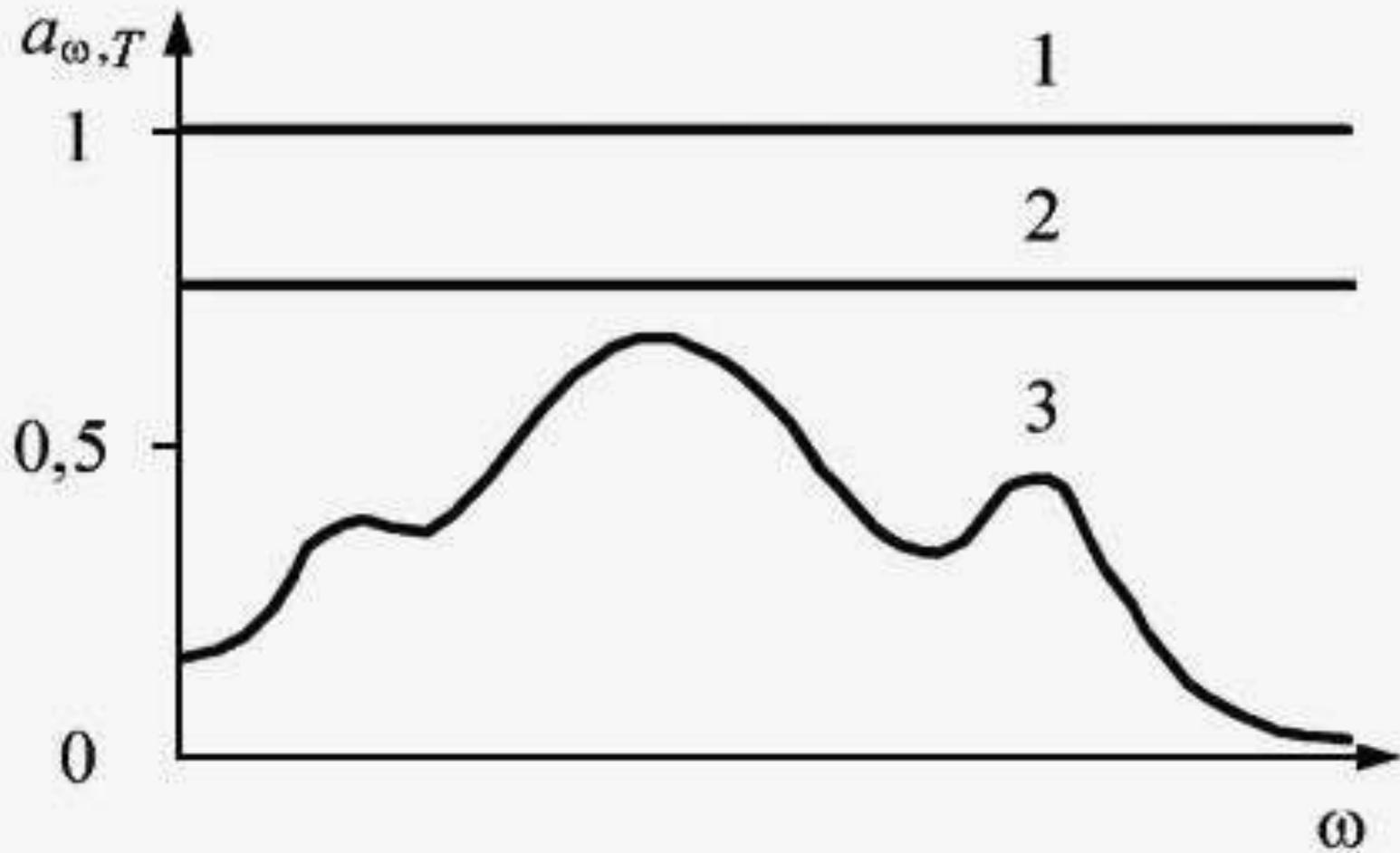
Сажа, платиновая чернь, черный бархат имеют в определенном диапазоне частот поглотительную способность $\alpha_{\nu,T} \approx 1$.



Полость с малым отверстием и зачерненной внутренней поверхностью очень близка по своим свойствам к абсолютно черному телу.



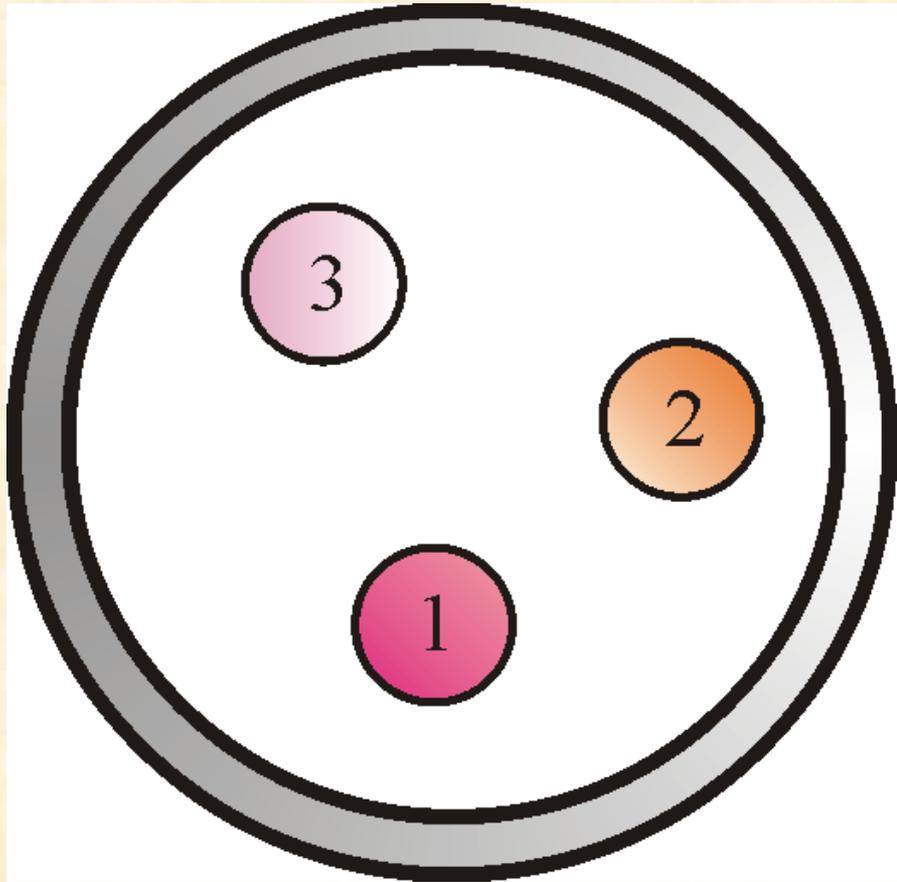
Луч, попавший
внутрь, после
многократных
отражений
обязательно
поглощается, причём
луч любой частоты



Спектральная поглощательная способность тела:

1 – абсолютно черное тело; 2 – серое тело;

3 – реальное тело



Между испускательной и поглощательной способностью тела существует определенная связь. Пусть внутри замкнутой оболочки в вакууме находятся три тела. Обмен энергией может происходить только за счет излучения

В результате, такая система через некоторое время придет в состояние теплового равновесия



Кирхгоф Густав Роберт (1824 – 1887) – немецкий физик. Работы посвящены электричеству, механике, гидродинамике, математической физике, оптике, гидродинамике. Построил общую теорию движения тока в проводниках. Развил строгую теорию дифракции.

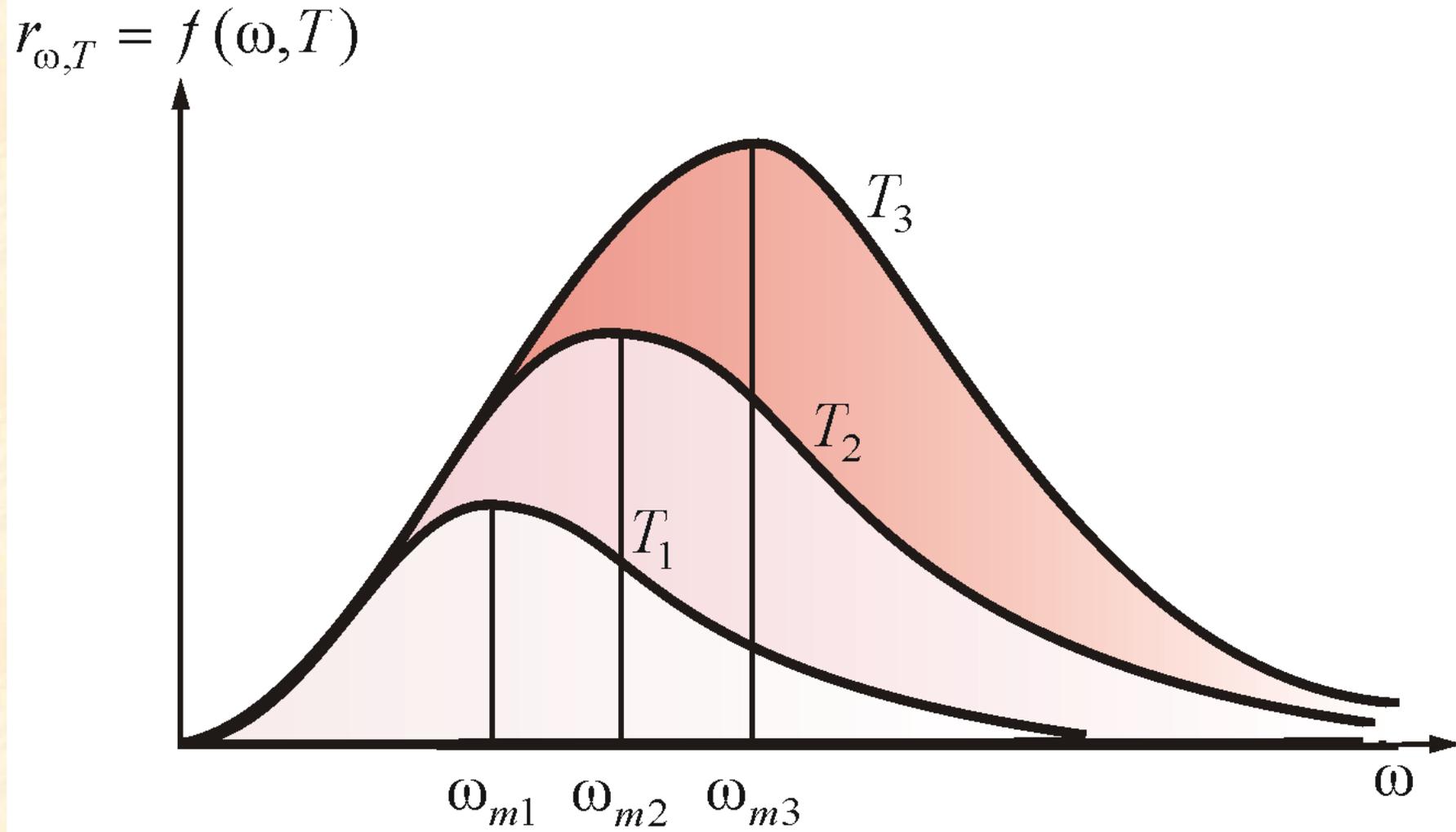
Установил (в 1856 году) один из основных законов теплового излучения, согласно которому отношение испускательной способности тела к поглотительной не зависит от природы излучающего тела (закон Кирхгофа). (в 1862 году предложил модель абсолютно черного тела).

Отношение испускательной к поглотительной способности не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры.

$$\frac{r_{\nu,T}}{\alpha_{\nu,T}} = f(\nu, T)$$

где $f(\nu, T)$ – универсальная функция Кирхгофа

Разлагая это излучение в спектр можно найти экспериментальный вид функции $f(\omega, T)$



7.3. Закон Стефана-Больцмана



Йозеф Стефан,

австрийский физик (1835-1893)

Основные работы в различных областях физики (кинетической теории газов, теории теплового излучения, оптике, акустике, электромагнетизму и др.

В 1879 г. путём измерения теплоотдачи платиновой проволоки при различных температурах **установил пропорциональность излучаемой ею энергии четвертой степени абсолютной температуры.** Используя эту закономерность, впервые дал достоверную оценку температуры поверхности Солнца (около 6000 градусов). Теоретическое обоснование этого закона было дано в 1884 г. Людвигом Больцманом.



Больцман Людвиг (1844 – 1906) –
австрийский физик-теоретик, один из
основоположников классической статической
физик.

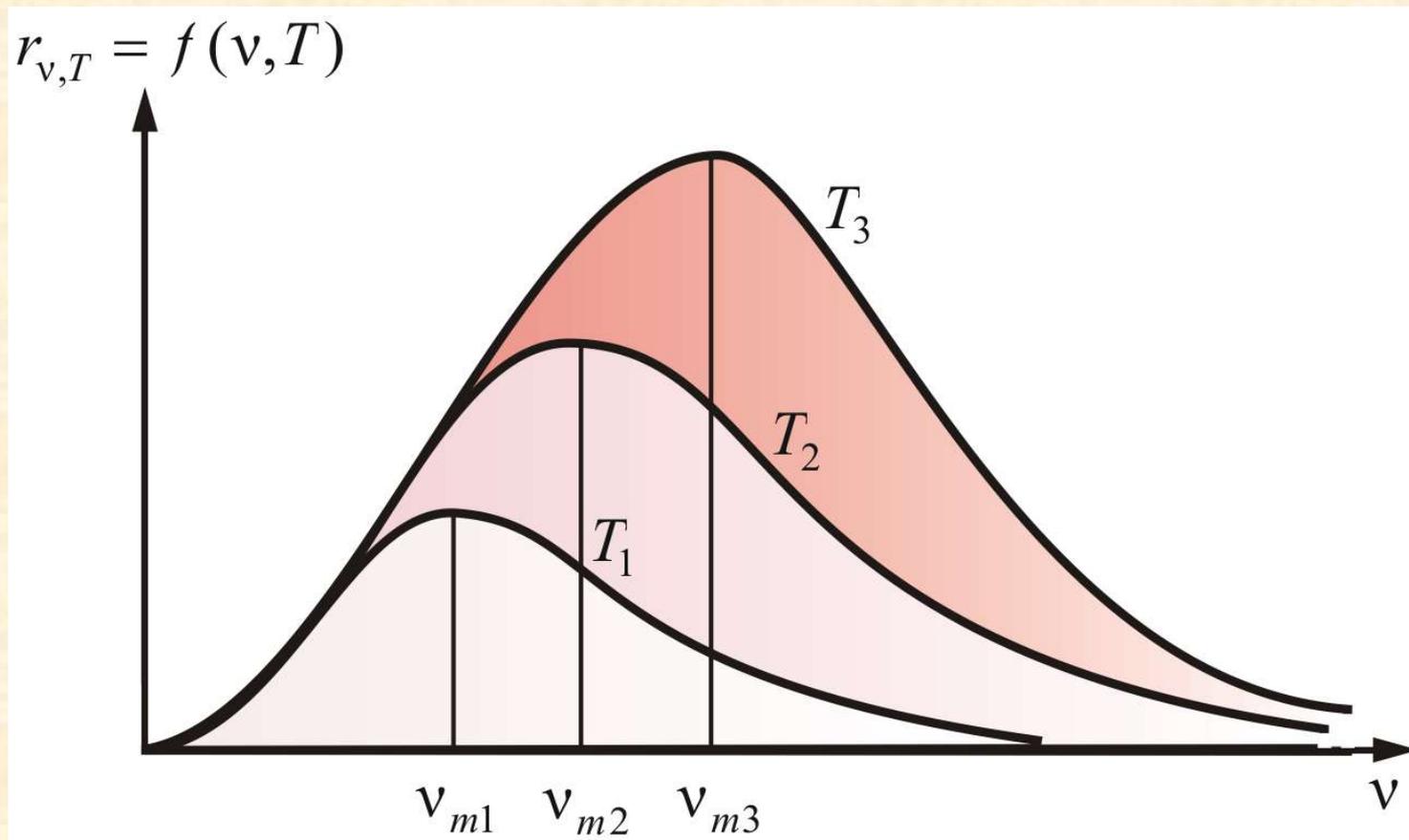
Основные работы в области кинетической теории газов, термодинамики и теории излучения. Вывел основное кинетическое уравнение газов, являющееся основой физической кинематики. Впервые применил к излучению принципы термодинамики.

Позднее Больцман, применив термодинамический метод к исследованию черного излучения (в предположении пропорциональности плотности энергии излучения его давлению), показал, что это справедливо только для *абсолютно черного тела*.

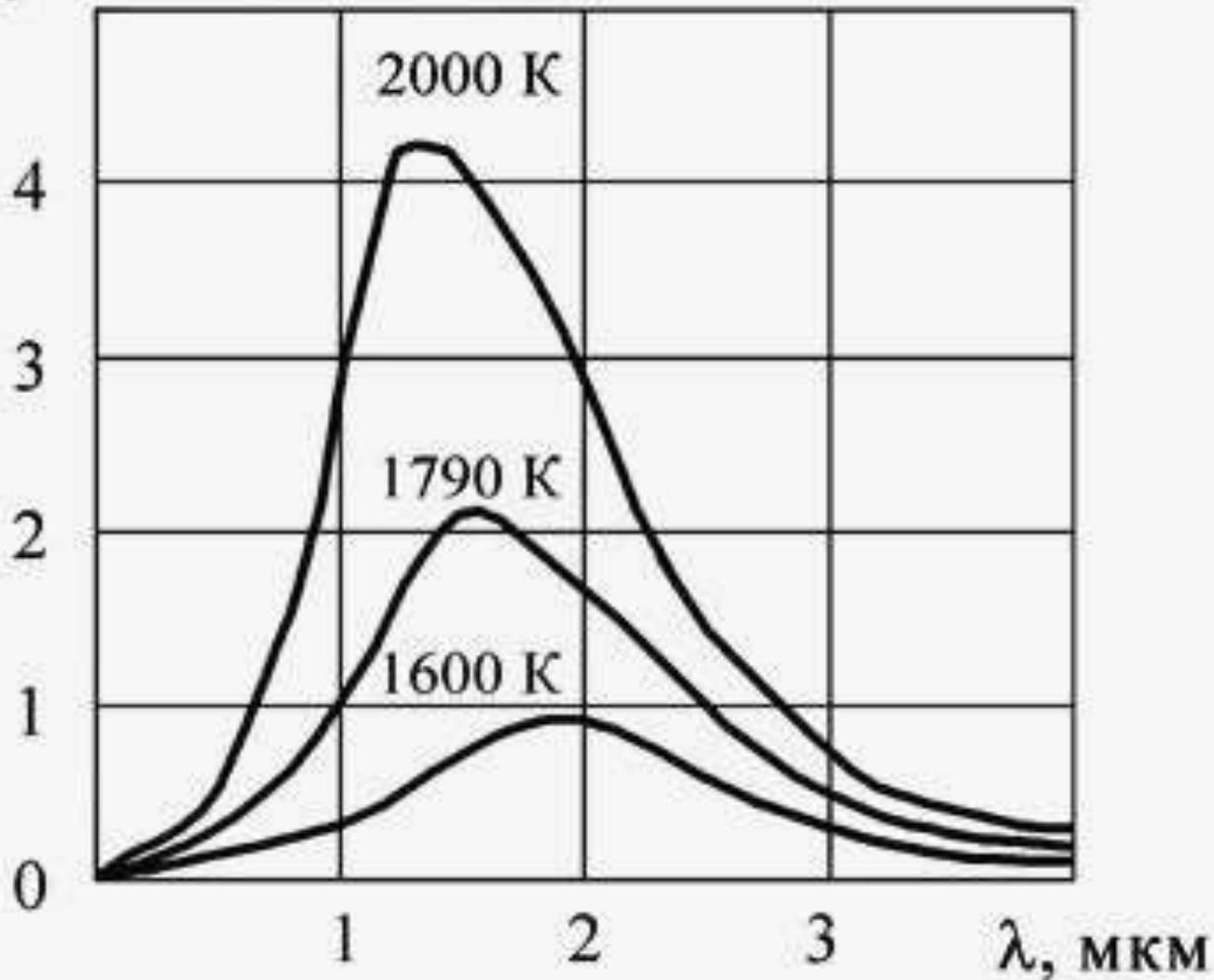
Площадь под кривой $r_{\nu,T} = f(T)$ равна

$$R = \sigma T^4 \text{ — закон Стефана-Больцмана}$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ В/м}^2 \cdot \text{К}^4$ — постоянная Стефана-Больцмана.

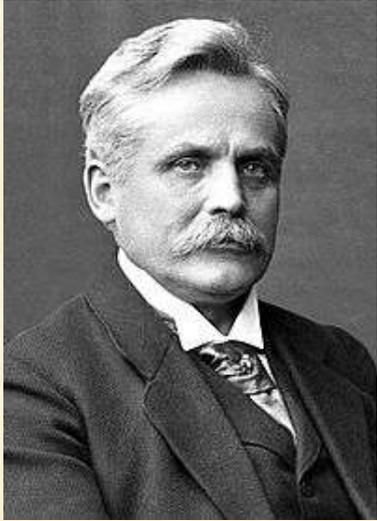


$r_{\lambda, T}^* \times 10^{-11} \text{ Вт/м}^3$



Спектральная плотность энергетической светимости
абсолютно черного тела

7.4. Законы смещения Вина



Вильгельм Вин (1864-1928)
выдающийся учёный-физик, лауреат
Нобелевской премии

В 1893 году **В. Вин** рассмотрел задачу об *адиабатическом* сжатии черного излучения в цилиндрическом сосуде. При выдвижении поршня энергия излучения единицы объема (плотность энергии) будет возрастать по двум причинам:

- за счёт уменьшения объема (общая величина энергии постоянна);
- за счёт работы совершаемой поршнем против давления излучения.

Но в силу эффекта Доплера (увеличение частоты излучения, отраженного от движущегося поршня) движение поршня приводит к изменению частоты излучения. **Окончательно Вин получил:**

$$r_{\nu, T} = C_1 \nu^3 e^{-\frac{C_2 \nu}{T}}$$

где: C_1 и C_2 – постоянные, которые Вин не расшифровал.



Хорошее согласие с опытом в коротковолновой части спектра, но не годится для длинноволновой

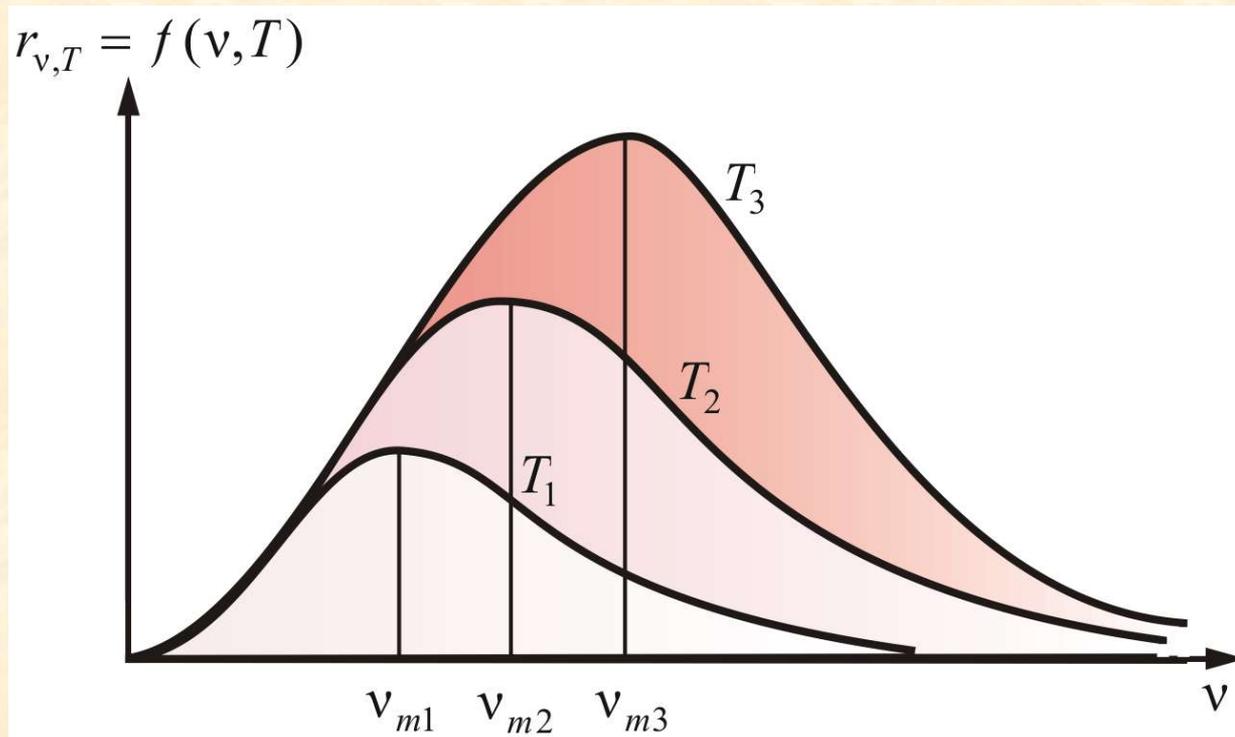
Но Вин нашел зависимость $\nu_{\max} = f(t)$ (ν_{\max} – частота, соответствующая максимальному значению $r_{\nu,T}$ абсолютно черного тела

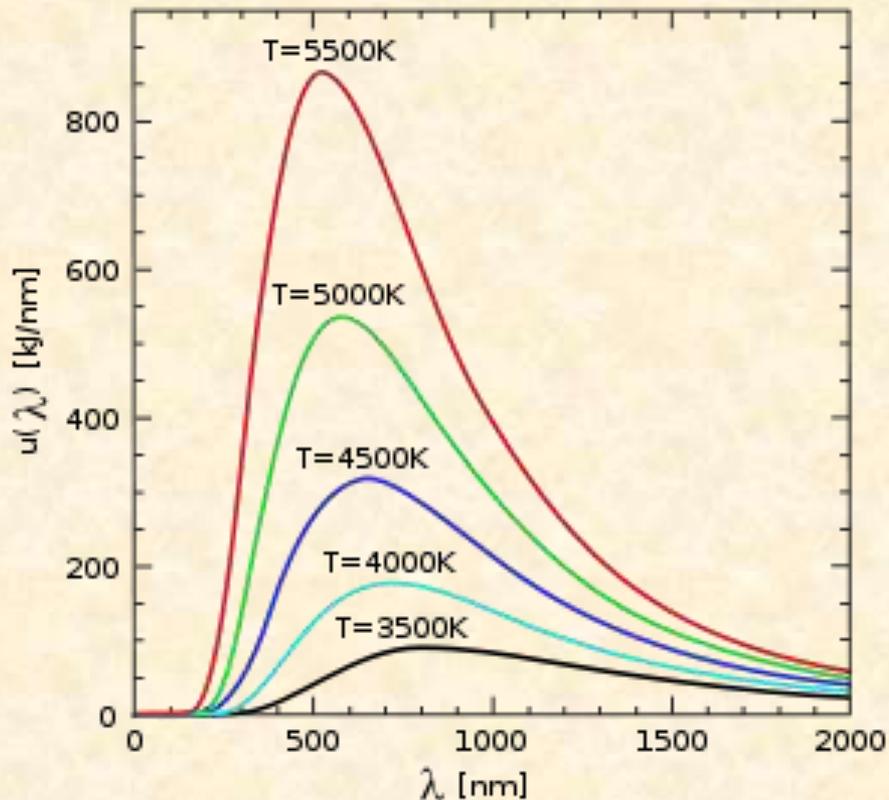
$$\frac{\nu_{\max}}{T} = b;$$

$$\left(\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \right)$$

Закон смещения Вина

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





Закон смещения Вина даёт зависимость длины волны, на которой поток излучения энергии чёрного тела достигает своего максимума, от температуры чёрного тела.

Кривые потока излучения абсолютно чёрных тел с разной температурой. Наглядно можно увидеть, что в возрастании температуры максимум излучения сдвигается в ультрафиолетовую часть спектра (в область коротких длин волн). Именно эту особенность и описывает закон Вина.

7.5. Формула Рэля-Джинса



Рэлей (Стретт) Джон Уильям (1842 – 1919) английский физик. Работы посвящены теории колебаний, одним из основоположников которой он является, акустике, теории теплового излучения, молекулярной физике, гидродинамике, электромагнетизму,

оптике. Исследовал колебания упругих тел, первый обратил внимание на автоколебания. Заложил основы теории молекулярного рассеяния света, объяснил голубой цвет неба. Сконструировал рефрактометр (рефрактометр Рэля).

Рассмотрел равновесное излучение в замкнутой полости с зеркальными стенками, как совокупность стоячих электромагнитных волн (осцилляторов).

Релей применил один из основных законов статистической физики – закон о равномерном распределении энергии между степенями свободы системы, находящейся в равновесии. Каждой стоячей волне со своей собственной частотой соответствует своя колебательная степень свободы, т.е. *каждый осциллятор в среднем имеет энергию, равную kT* :



$$\langle \varepsilon \rangle = kT$$

Джинс Джеймс Хопвуд (1877 – 1946)

– английский физик и астрофизик. Основные физические исследования посвящены кинетической теории газов и теории

теплового излучения. Вывел в 1905 формулу плотности энергии (закон Релея-Джинса). Работы Джинса посвящены также квантовой теории, математической теории электричества и магнетизма, теоретической механике, теории относительности.

В 1905 году Джинс уточнил расчеты Рэля и окончательно получил:

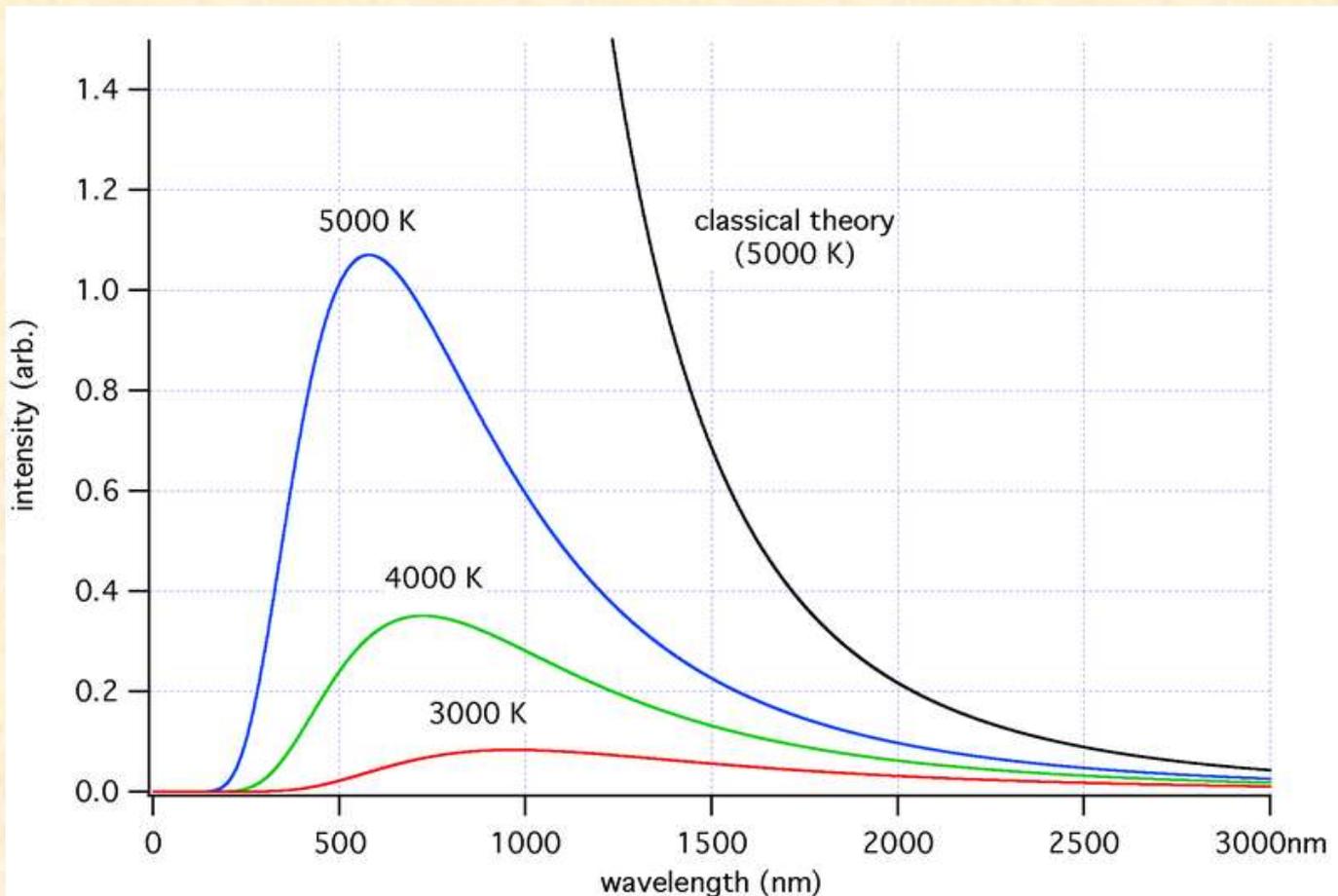
$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

формула Рэля - Джинса

по Рэлю-Джинсу



$r_{\nu,T}$ МОНОТОННО
возрастает с ростом
 ν^2 в отличие от
экспериментальной
кривой которая
имеет максимум



Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны для разных температур (выделены цветом) и её вид, исходя из классических рассуждений Релея и Джинса (черный цвет)

Попытка получить из формулы Рэля–Джинса закон Стефана-Больцмана ($R \sim T^4$) приводит к абсурду

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

Этот результат получил название **«ультрафиолетовой катастрофы»**, так как с точки зрения классической физики вывод Рэля-Джинса был сделан безупречно.

по Рэлю-Джинсу



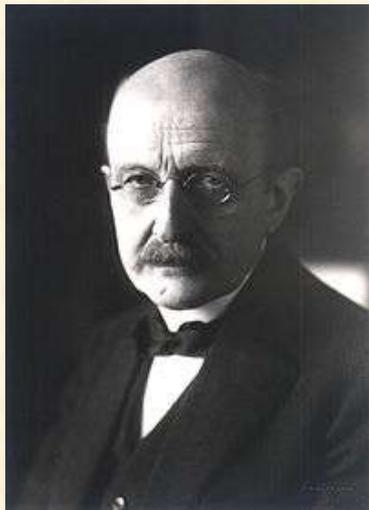
Ультрафиолетовая катастрофа - физический термин, описывающий парадокс классической физики, состоящий в том, что полная мощность теплового излучения любого нагретого тела должна быть бесконечной. Название парадокс получил из-за того, что спектральная плотность мощности излучения должна была неограниченно расти по мере сокращения длины волны.

По сути этот парадокс показал если не внутреннюю противоречивость классической физики, то во всяком случае крайне резкое (абсурдное) расхождение с элементарными наблюдениями и экспериментом.

Так как это не согласуется с экспериментальным наблюдением, в конце 19 века возникали трудности в описании фотометрических характеристик тел.

Проблема была решена при помощи квантовой теории излучения Макса Планка в 1900 году.

7.6. Формула Планка



Планк Макс Карл Эрнст Людвиг

(1858 – 1947)

– немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой теории. Работы относятся к термодинамике, теории теплового излучения, теории относительности, квантовой теории, истории и методологии физики, философии науки.

Вывел закон распределения энергии в спектре абсолютно черного тела. Ввел фундаментальную постоянную с размерностью действия. Формула закона Планка сразу же получила экспериментальное подтверждение. Использовал простую модель излучающей системы (стенок полости) в виде гармонических осцилляторов (электрических диполей) со всевозможными собственными частотами. Но Планку пришла мысль связать с энергией осциллятора не его температуру, а его *энтропию*.

Термодинамическая вероятность — число возможных микроскопических комбинаций, совместимое с данным состоянием в целом.

Планк отказался от установившегося положения классической физики, согласно которому энергия любой системы может изменяться **непрерывно**, т.е. может принимать любые сколь угодно близкие значения.

Согласно выдвинутой Планком квантовой гипотезе, атомные осцилляторы изучают энергию не непрерывно, а определенными порциями — квантами, причем энергия кванта пропорциональна частоте колебания.

Итак, энергия осциллятора должна быть целым кратным некоторой единицы энергии, пропорциональной его частоте:

$$E_n = nh\nu,$$

Минимальная порция энергии $E = h\nu = \hbar\omega$

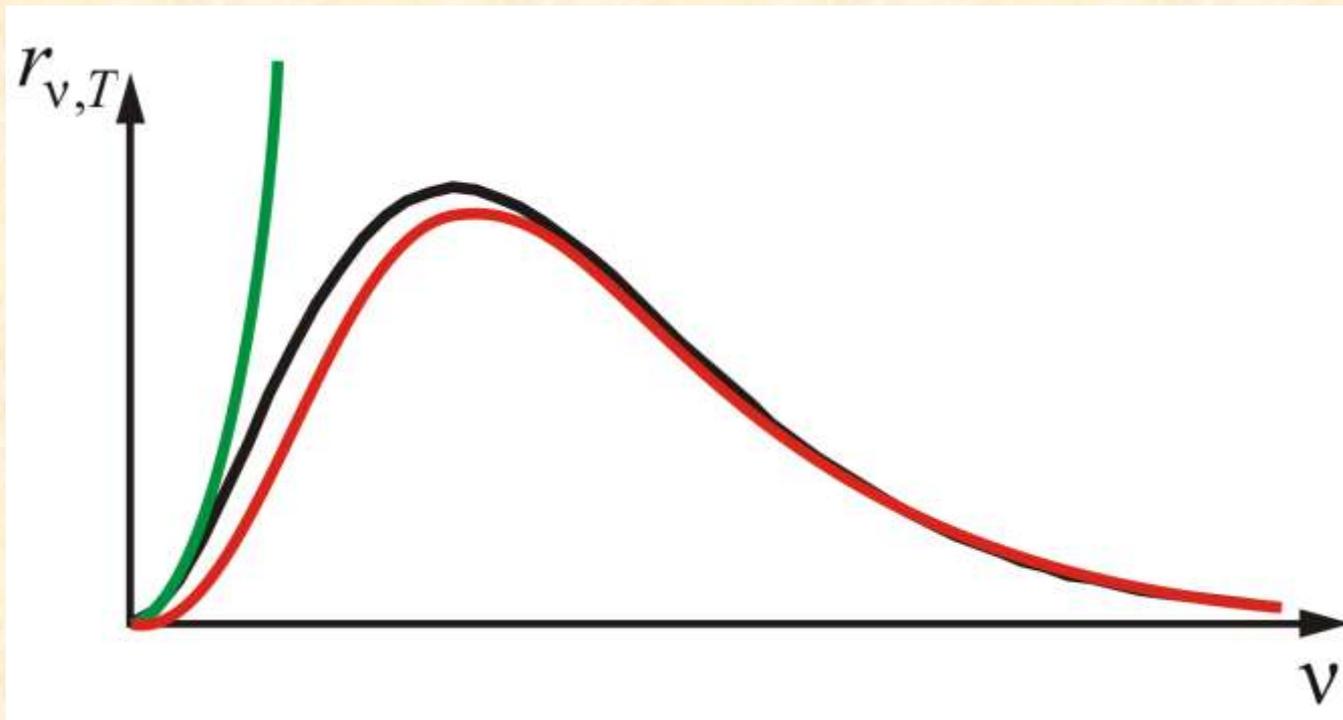
где $\omega = 2\pi\nu$ и $\hbar = h / 2\pi$

$$\left. \begin{array}{l} h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ \hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \end{array} \right\} \text{квант действия -}$$

постоянная Планка

Окончательный вид *формулы Планка*

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



Формула Планка

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

1) В области малых частот, т.е. при $h\nu \ll kT$

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} = 1 + \frac{h\nu}{kT} + \dots$$

Получаем формулу Рэля-Джинса

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

2) В области больших частот, при $h\nu \gg kT$
из формулы Планка получаем **формулу Вина**

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

3) Также из формулы Планка можно получить **закон Стефана-Больцмана:**

$$R = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

Отсюда можно вывести закон Стефана-Больцмана:

$$R = \sigma T^4$$

Другая форма записи формулы Планка

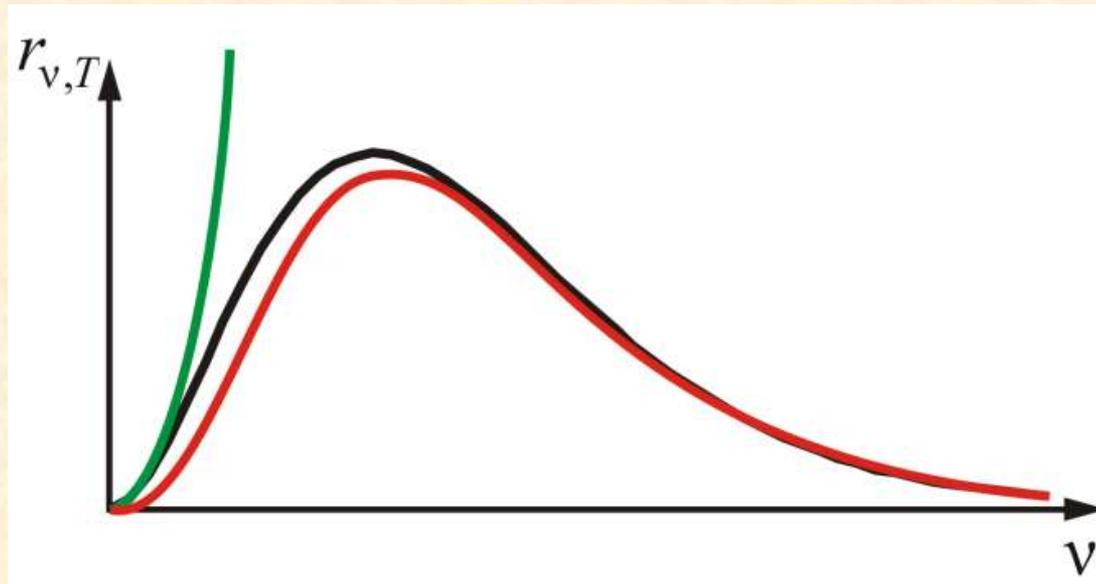
$$r_{\omega,T} = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2} \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} \quad \text{ИЛИ}$$

$$r_{\lambda,T} = \frac{4\pi^2\hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{2\pi\hbar c/kT\lambda} - 1}$$

Для универсальной функции Кирхгофа Планк вывел формулу

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

Формула блестяще согласуется с экспериментальными данными по распределению энергии в спектрах излучения черного тела во всем интервале частот и температур



Теоретически вывод этой формулы М. Планк изложил 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества.

Этот день стал *датой рождения квантовой физики.*

Из формулы Планка, зная универсальные постоянные h , k и c , можно вычислить постоянную Стефана-Больцмана σ и Вина b . С другой стороны, зная экспериментальные значения σ и b , можно вычислить h и k (именно так и было впервые найдено числовое значение постоянной Планка).

Оптическая пирометрия

(конспект - самостоятельно)