

# **ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

# Тепловое излучение

Тела, нагретые до достаточно высоких температур, светятся. Свечение тел, обусловленное нагреванием, называется тепловым (или температурным) излучением

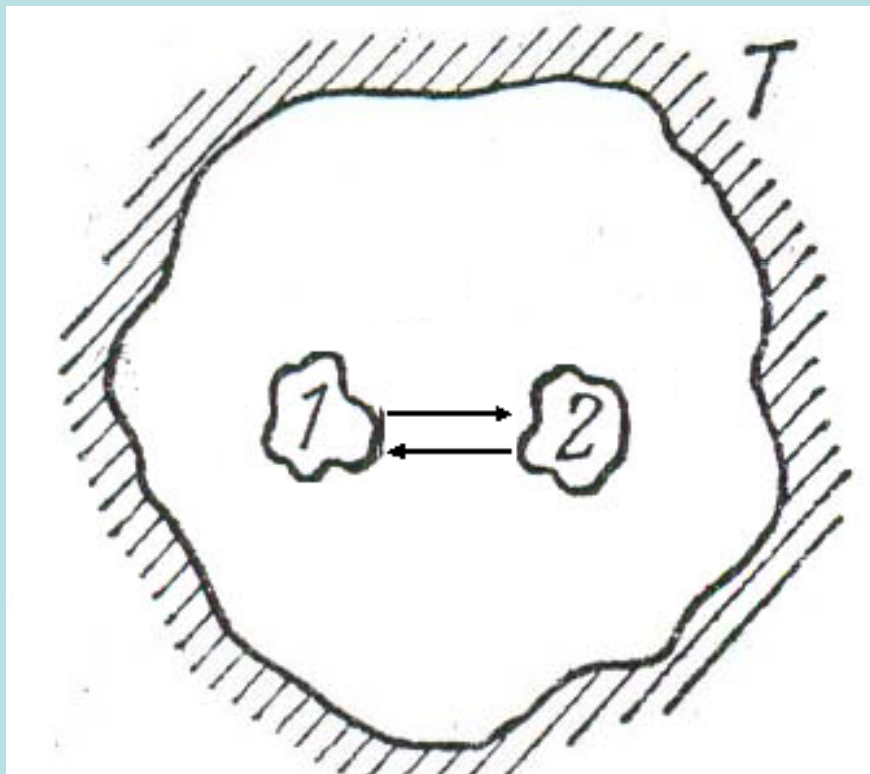
**Тепловое излучение – электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии.**

Опыт показывает, что единственным видом излучения, которое может находиться в **равновесии** с излучающими телами, является **тепловое излучение**.

# Тепловое излучение

Опыт показывает, что **тепловое излучение** – единственный вид излучения, которое может быть **равновесным**

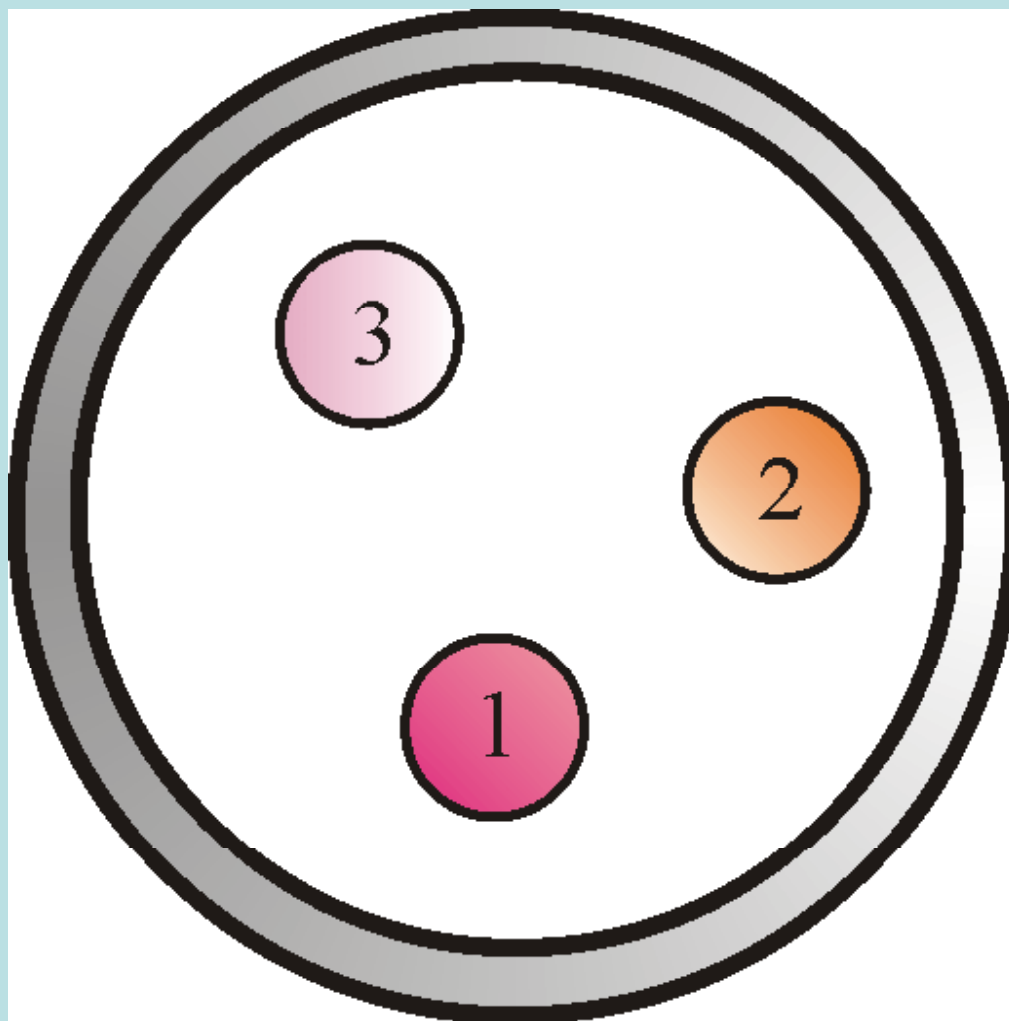
Все другие  
виды излучения  
**неравновесны**



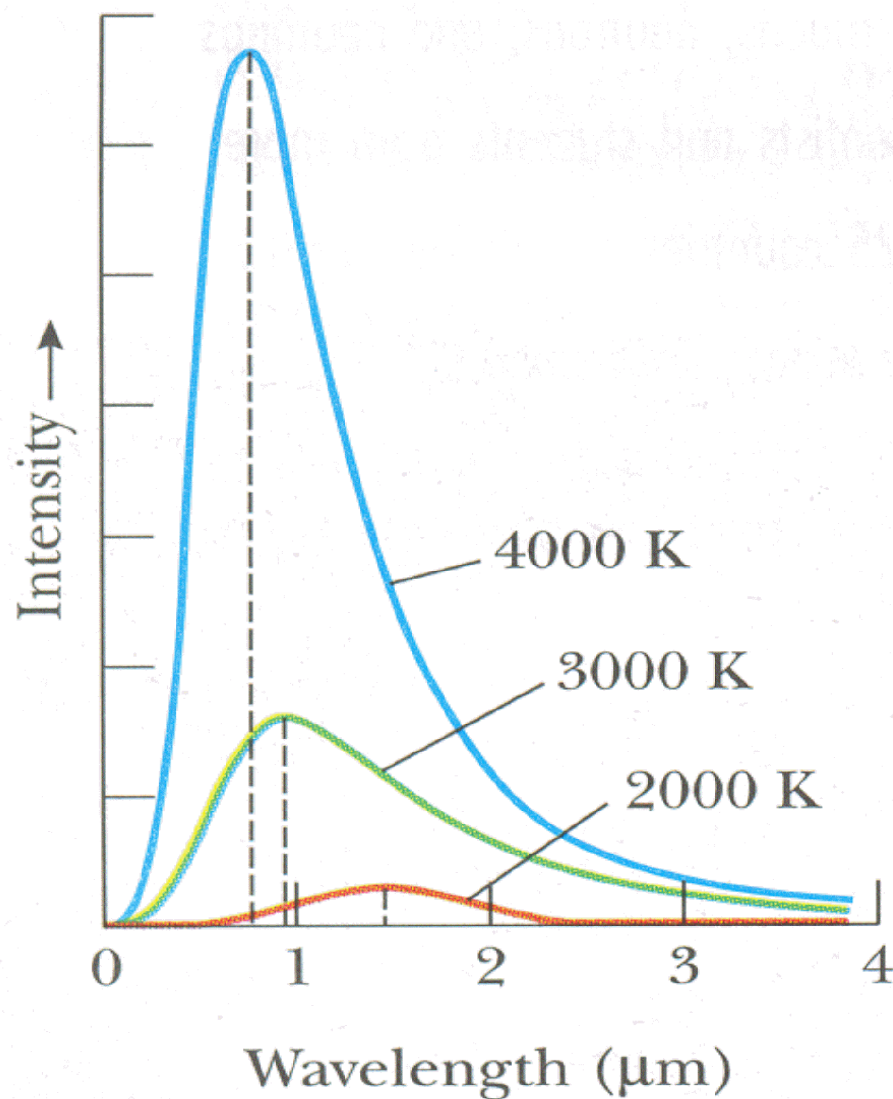
# Тепловое излучение

Опыт показывает, что **тепловое излучение** – единственный вид излучения, которое может быть **равновесным**

Все другие виды излучения **неравновесны**



# Тепловое излучение



**Причина –  
энергия  
теплового  
движения  
атомов и  
молекул**

# Характеристики теплового излучения

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

$$R_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{изл.}}{d\nu}$$

где  $dW_{\nu, \nu+d\nu}^{изл.}$  - энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени (мощность излучения) с единицы площади поверхности тела в интервале частот от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ .

$$[R_{\nu, T}] = \text{Дж/м}^2 \cdot \text{с}$$

# Характеристики теплового излучения

**спектральная плотность  
энергетической светимости**

$$1). dW_{\nu, \nu+d\nu}^{\text{изл.}} = R_{\nu, T} d\nu = R_{\lambda, T} d\lambda$$

$$2). c = \lambda \nu \quad \Rightarrow \quad \frac{d\lambda}{d\nu} = -\frac{c}{\nu^2} = -\frac{\lambda^2}{c}$$

⇓

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

**спектральная плотность  
энергетической светимости**

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{изл.}}}{d\nu}$$



**Интегральная энергетическая светимость**

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu,T} d\nu$$



## Спектральная поглощательная способность

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{\text{погл.}}}{dW_{\nu, \nu+d\nu}}$$

Определяет, какая доля энергии, приносимой за единицу времени на единицу площади поверхности тела падающими на нее электромагнитными волнами с частотами в интервале от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ , *поглощается* телом.

# Черное тело

# Черное тело

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{\text{погл.}}}{dW_{\nu, \nu+d\nu}}$$

Спектральная  
поглощательная  
способность

# Черное тело

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{\text{погл.}}}{dW_{\nu, \nu+d\nu}}$$

Тело, поглощающее ПОЛНОСТЬЮ при ЛЮБОЙ температуре ВСЁ падающее на него излучение ЛЮБОЙ частоты, называется ЧЕРНЫМ ТЕЛОМ

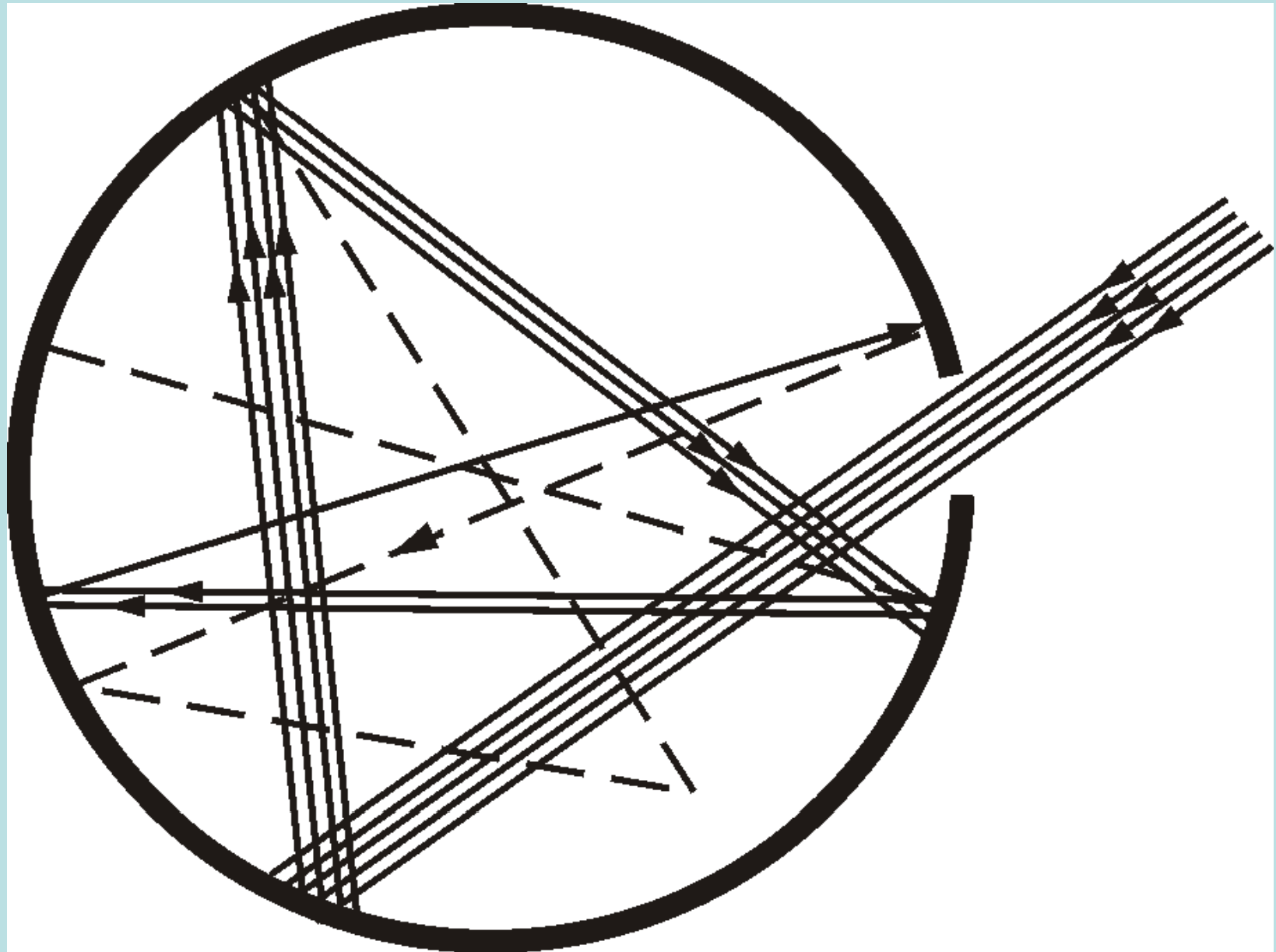


$$A_{\nu, T}^{\text{черн.}} = 1$$

Спектральная  
поглощательная  
способность

(сажа, черный бархат, Солнце)

# Черное тело



## Серое тело

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{погл.}}{dW_{\nu, \nu+d\nu}}$$

Тело, поглощательная способность которого МЕНЬШЕ единицы, но ОДИНАКОВА для ВСЕХ ЧАСТОТ и зависит только от температуры, материала и поверхности тела, называется СЕРЫМ ТЕЛОМ

$$A_{\nu, T}^{с.т.} = const < 1$$

## Серое тело

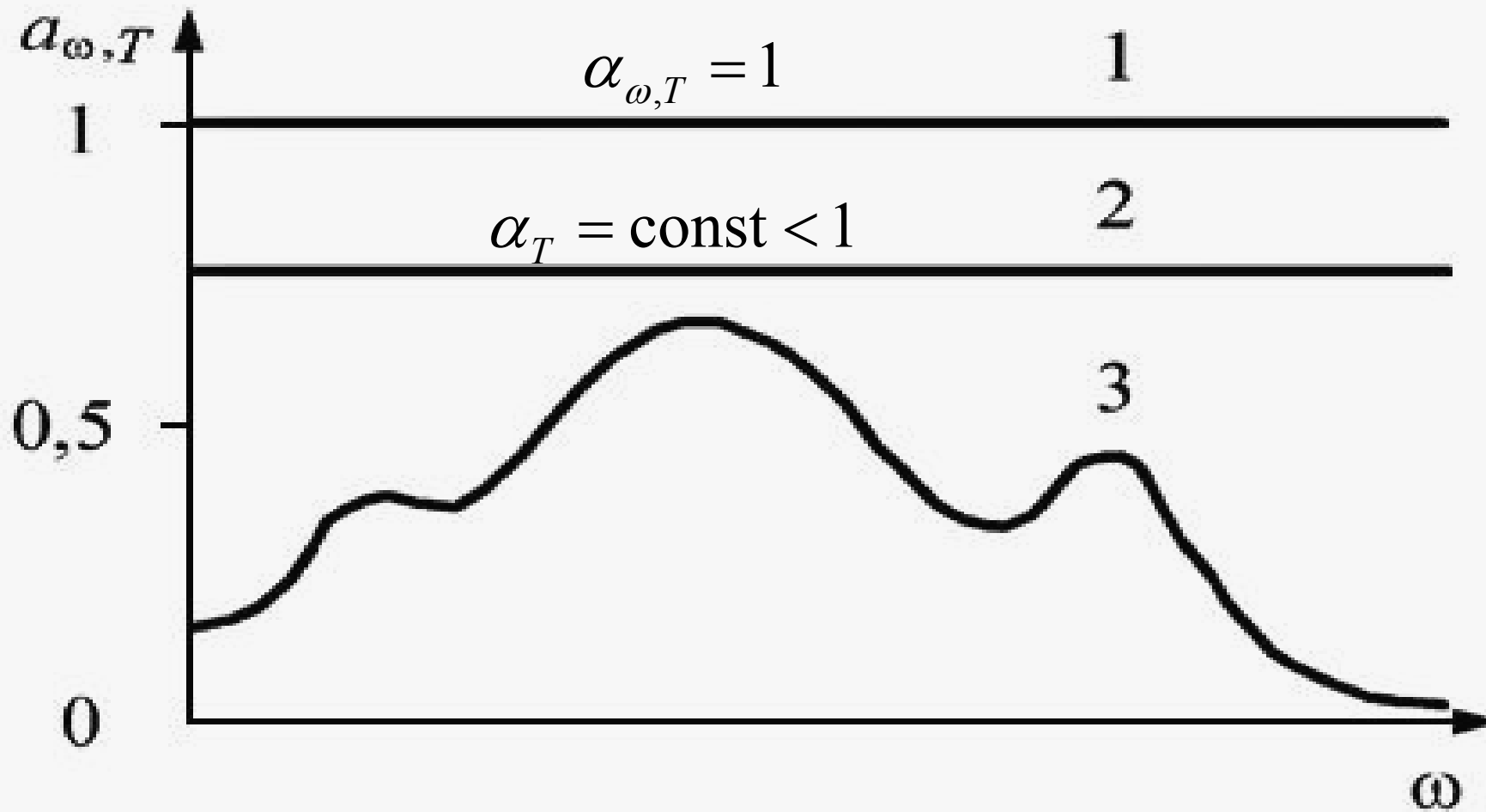
$$A_{\nu, T}^{c.m.} = const < 1$$

В видимой области спектра свойствами серого тела обладают:

каменный уголь ( $A_{\nu, T} = 0,80$  при 400- 900 К),

сажа ( $A_{\nu, T} = 0,94-0,96$  при 370-470 К),

платиновая и висмутовая черни поглощают и излучают как С. Т. в наиболее широком интервале - от видимого света до 25-30 мкм ( $A_{\nu, T} = 0,93-0,99$ ).



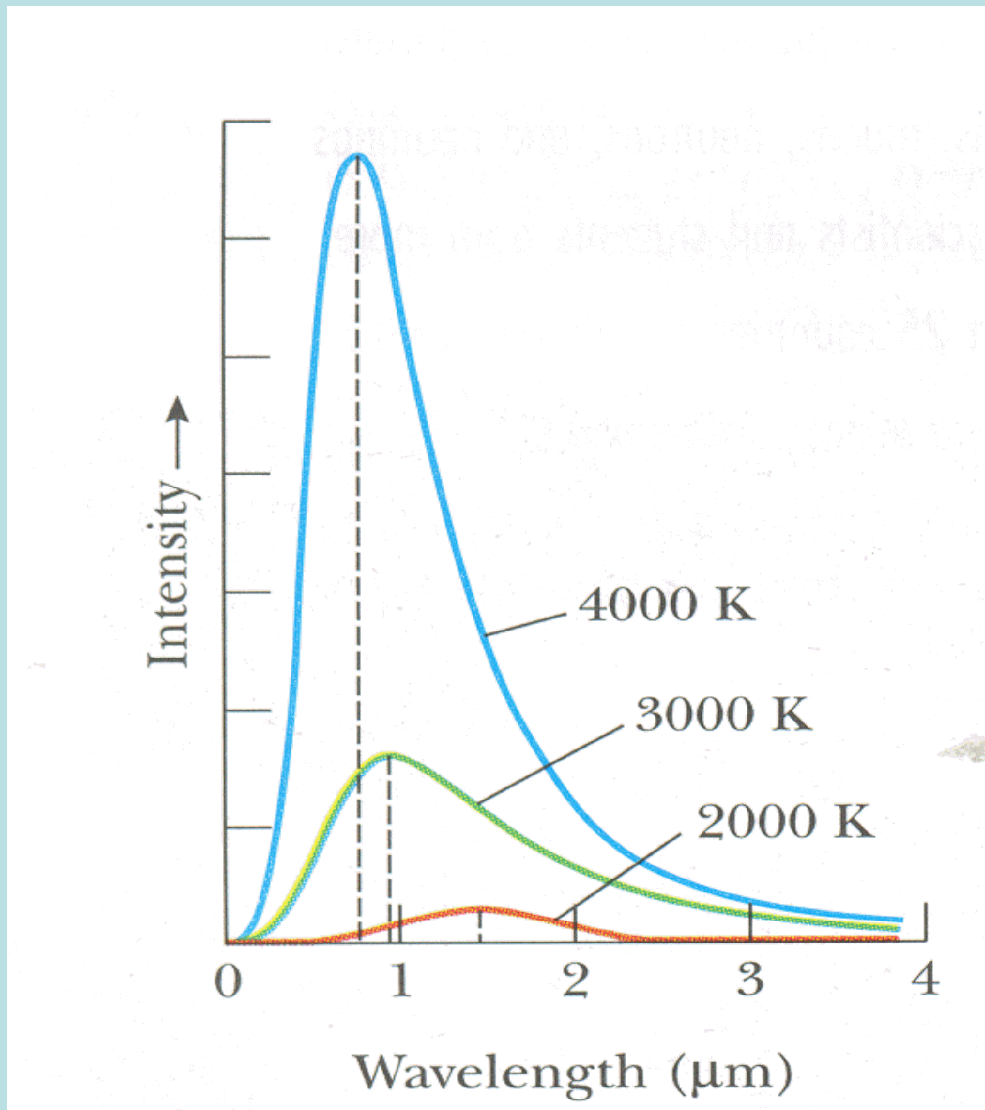
Спектральная поглощательная способность тела:

1 – абсолютно черное тело; 2 – серое тело;

3 – реальное тело

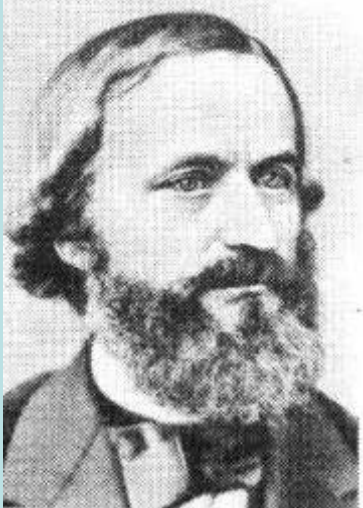


# Тепловое излучение --> квантовая теория



Основная проблема –  
понять наблюдаемое  
распределение  
излучения испускаемого  
черным тел по длинам  
волн: законы теплового  
излучения

Излучение абсолютно черного тела.  
Непрерывный спектр.



## Закон Кирхгофа

**Кирхгоф Густав Роберт** (1824 – 1887) – немецкий физик. Работы посвящены электричеству, механике, гидродинамике, математической физике, оптике, гидродинамике.

Построил общую теорию движению тока в проводниках. Развил строгую теорию дифракции. **В 1856 г. сформулировал один из основных законов теплового излучения, согласно которому отношение испускательной способности тела к поглощательной не зависит от природы излучающего тела (закон Кирхгофа).**

# Закон Кирхгофа

*Отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглотительной способности не зависит от природы тела и является для всех тел одной и той же универсальной функцией частоты и температуры:*

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$$

*универсальная функция Кирхгофа*

## Закон Кирхгофа

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$$

Для черного тела  $A_{\nu,T} = 1 \Rightarrow R_{\nu,T} = r_{\nu,T}$



**Универсальная функция Кирхгофа**  $r_{\nu,T}$  - не что иное, как **спектральная плотность энергетической светимости черного тела**



Для **ВСЕХ** тел отношение **спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглотительной способности** равно **спектральной плотности энергетической светимости черного тела** при той же температуре и частоте

## Закон Кирхгофа:

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$$

(два важных следствия)

$$R_{\nu,T} = r_{\nu,T} A_{\nu,T}$$

1). Спектральная плотность энергетической светимости любого реального тела в любой области спектра ВСЕГДА меньше спектральной плотности энергетической светимости черного тела (при тех же  $T$  и  $\nu$ ):

$$A_{\nu,T} < 1 \quad \Rightarrow \quad R_{\nu,T} < r_{\nu,T}$$

2). Если тело не поглощает электромагнитные волны какой-то частоты, то оно их и не излучает:

$$A_{\nu,T} = 0 \quad \Rightarrow \quad R_{\nu,T} = 0$$

## Закон Кирхгофа:

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$$

(энергетическая светимость)

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu,T} d\nu$$

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

⇓

Для серого тела

$$R_T^{сер} = A_T \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = A_T R_e$$

где

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu$$

- энергетическая светимость черного тела (зависит только от температуры)

## Закон Кирхгофа

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$$

Закон Кирхгофа описывает ТОЛЬКО тепловое излучение. Если излучение не подчиняется закону Кирхгофа, то оно не тепловое.

## Закон Стефана-Больцмана

Австрийский физик **Стефан** в 1879 году анализируя экспериментальные данные, пришел к выводу, что энергетическая светимость *любого* тела пропорциональна  $T^4$ .



**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.**



## Закон Стефана-Больцмана

Спектральная плотность энергетической светимости черного тела - *универсальная функция*. Поэтому нахождение ее явной зависимости от частоты и температуры является важной задачей.

### Закон Стефана-Больцмана:

энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его температуры:

$$R_e = \sigma T^4$$

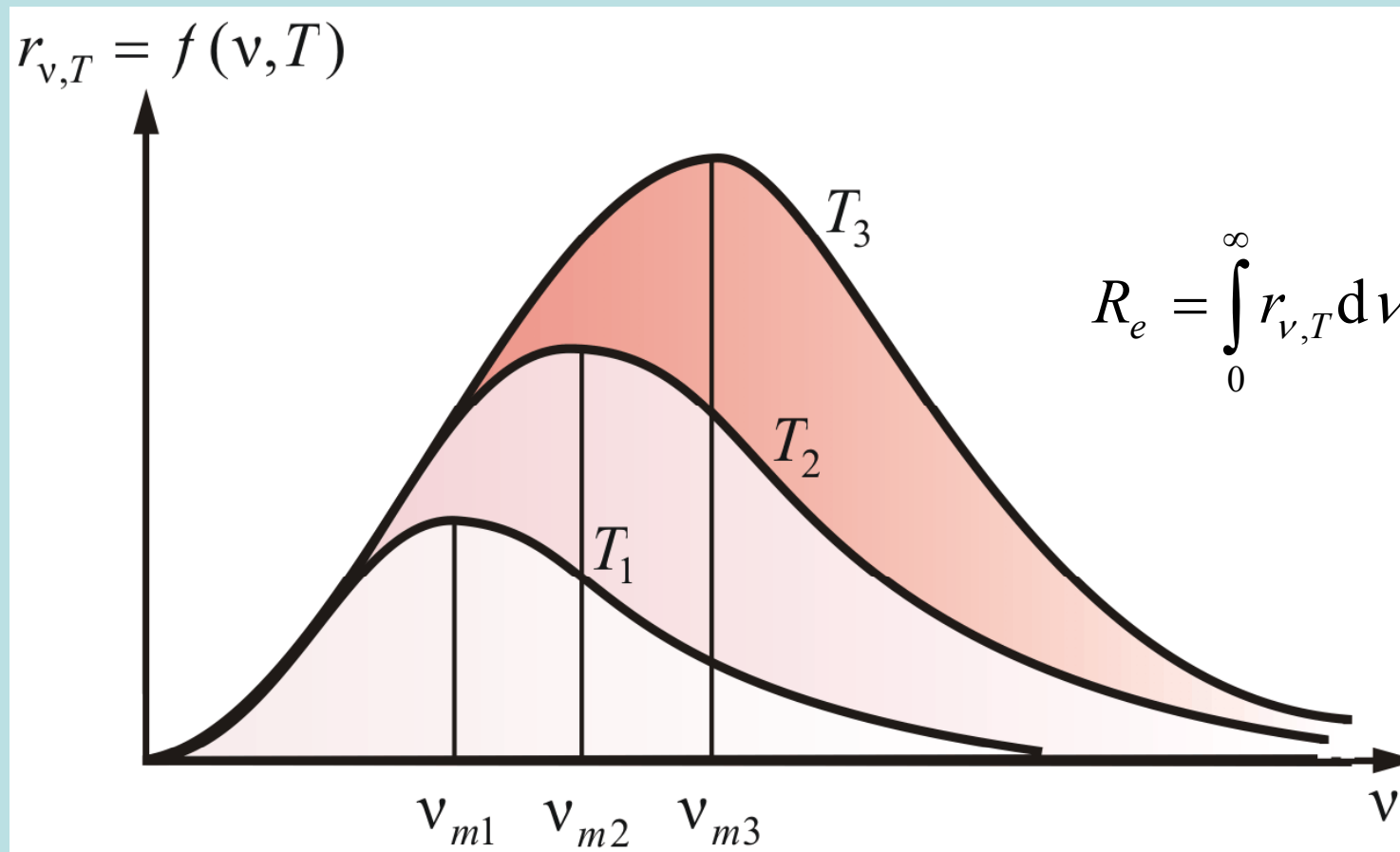
$\sigma$  - Постоянная Стефана-Больцмана

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu$$

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

$$R_e = \sigma T^4 \quad \text{– закон Стефана-Больцмана}$$

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



# Законы Вина

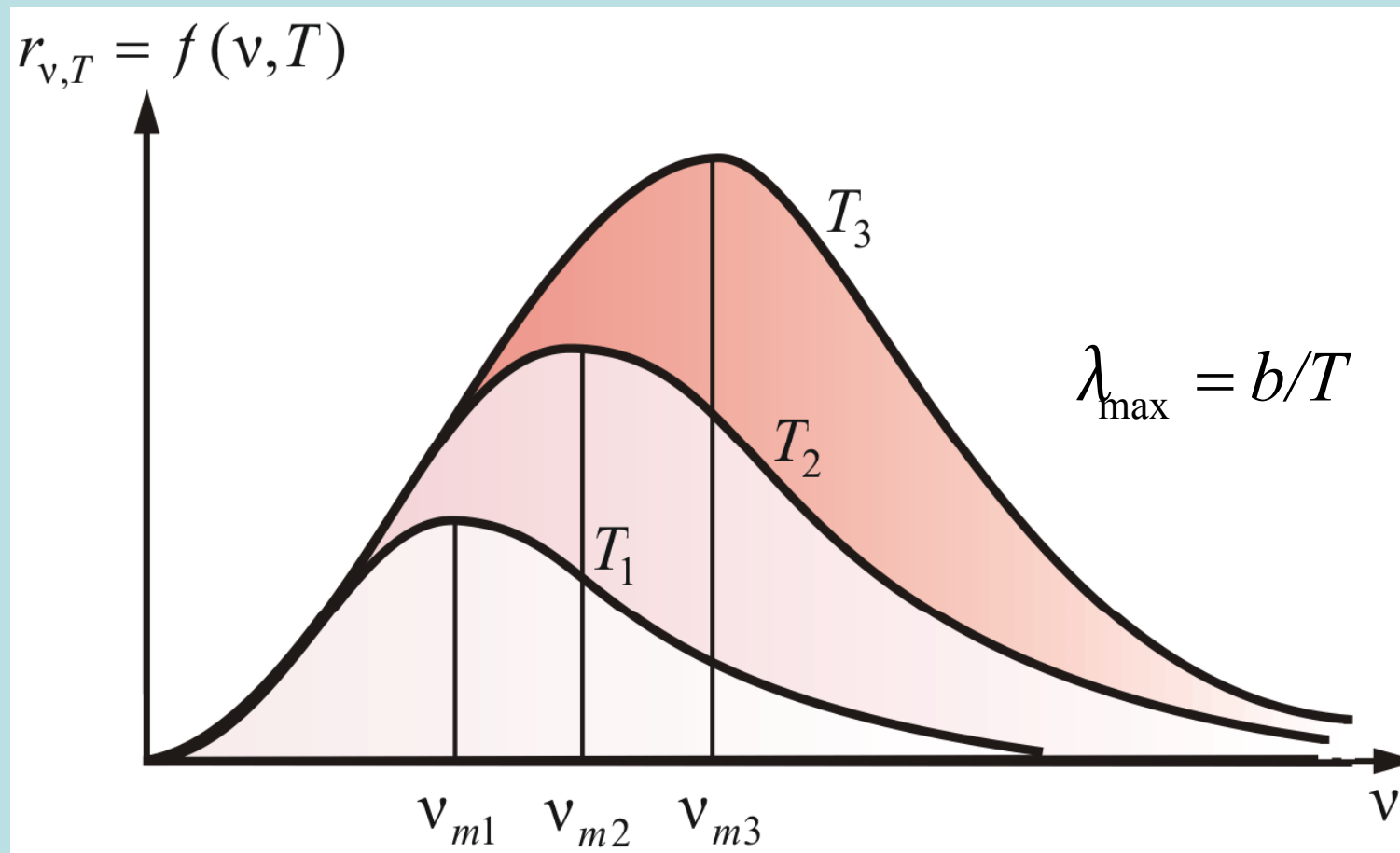
В 1893 году немецкий ученый **Вильгельм Вин** рассмотрел задачу об *адиабатическом* сжатии черного излучения в цилиндрическом сосуде и **установил зависимость длины волны  $\lambda_{\max}$ , соответствующей максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\lambda,T}$  черного тела от температуры  $T$ .**

Закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = b / T.$$

$$\lambda_{\max} = b/T \quad \text{- закон смещения Вина} \quad \left( \text{или } \frac{\nu_{\max}}{T} = c/b \right)$$

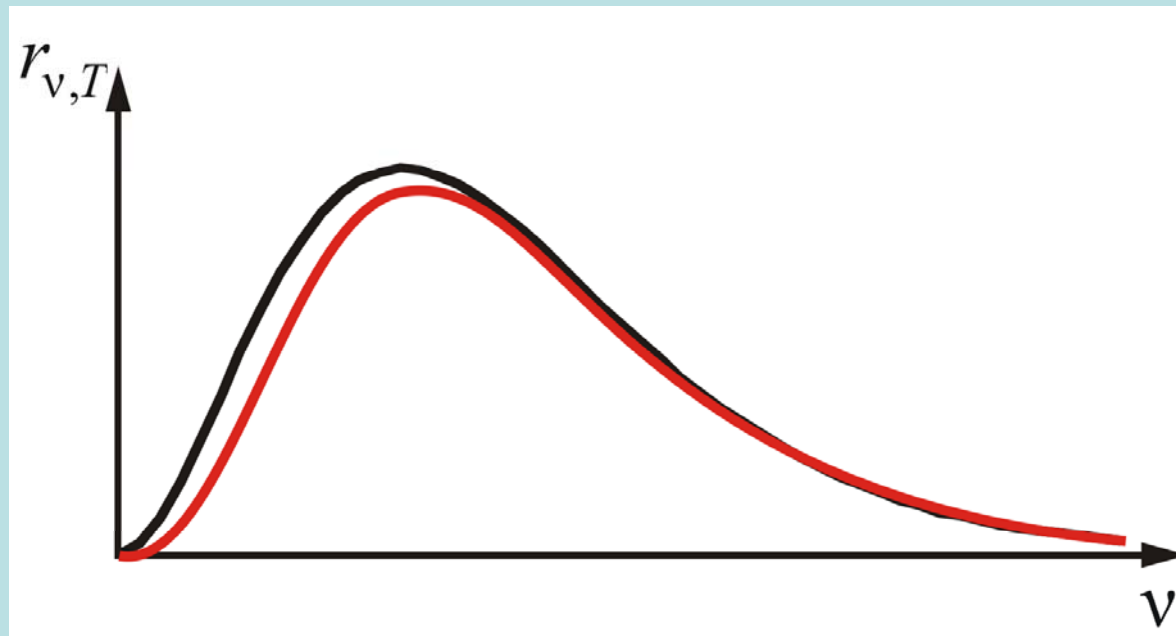
$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} \quad \text{Постоянная Вина}$$



# Законы Вина

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

где  $C_1$  и  $C_2$  постоянные, смысл которых Вин не смог объяснить.



# 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).*

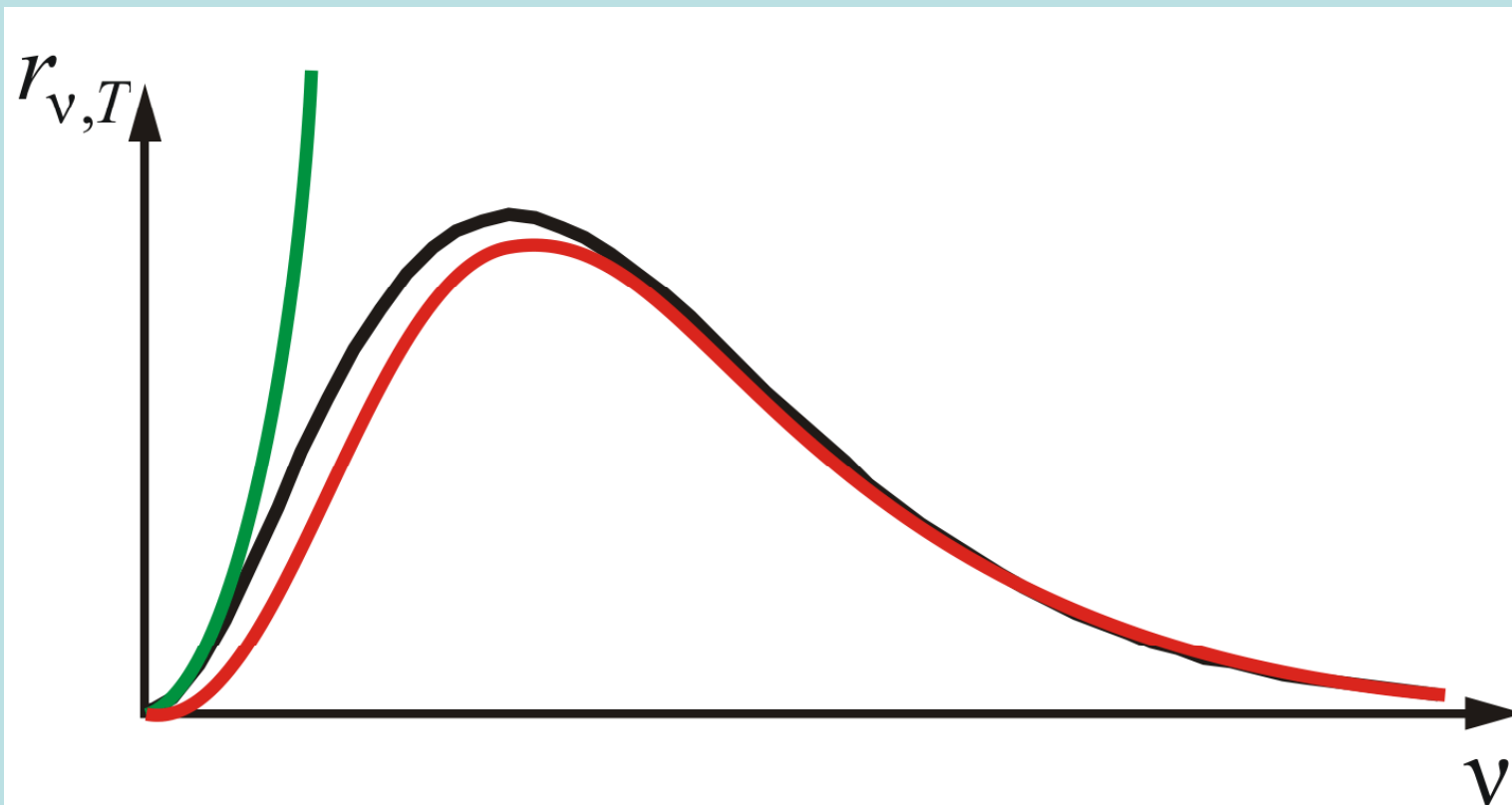


**Джинс Джеймс Хопвуд** (1877 – 1946) – английский физик и астрофизик. Основные физические исследования посвящены кинетической теории газов и теории теплового излучения.

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 получил для универсальной функции Кирхгофа:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \quad \Leftarrow \text{формула Рэля - Джинса}$$





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

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





## 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 (постоянная Планка) с размерностью действия.

## Гипотеза Планка (1900 г.)

- *Энергия осциллятора может принимать не любые, а только вполне определенные дискретные значения  $\varepsilon$ , пропорциональные некоторой элементарной порции – кванту энергии  $\varepsilon_0$ . Поэтому испускание излучения осциллятором осуществляется не непрерывно, а дискретно в виде отдельных квантов, величина которых пропорциональна частоте излучения:*

$$\varepsilon = n h \nu \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$h=6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.

# Гипотеза Планка.

## Распределение Планка

Вероятность того что осциллятор находится в состоянии с энергией  $\varepsilon_n$  пропорциональна

$$e^{-\varepsilon_n / (kT)}$$

В классической термодинамике  $\bar{\varepsilon} = kT$

В рассматриваемой модели  $\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$

# Гипотеза Планка.

## Распределение Планка

Универсальная функция Кирхгофа (спектральная плотность энергетической светимости черного тела)

В классической термодинамике

$$\bar{\varepsilon} = kT \quad \Rightarrow \quad r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

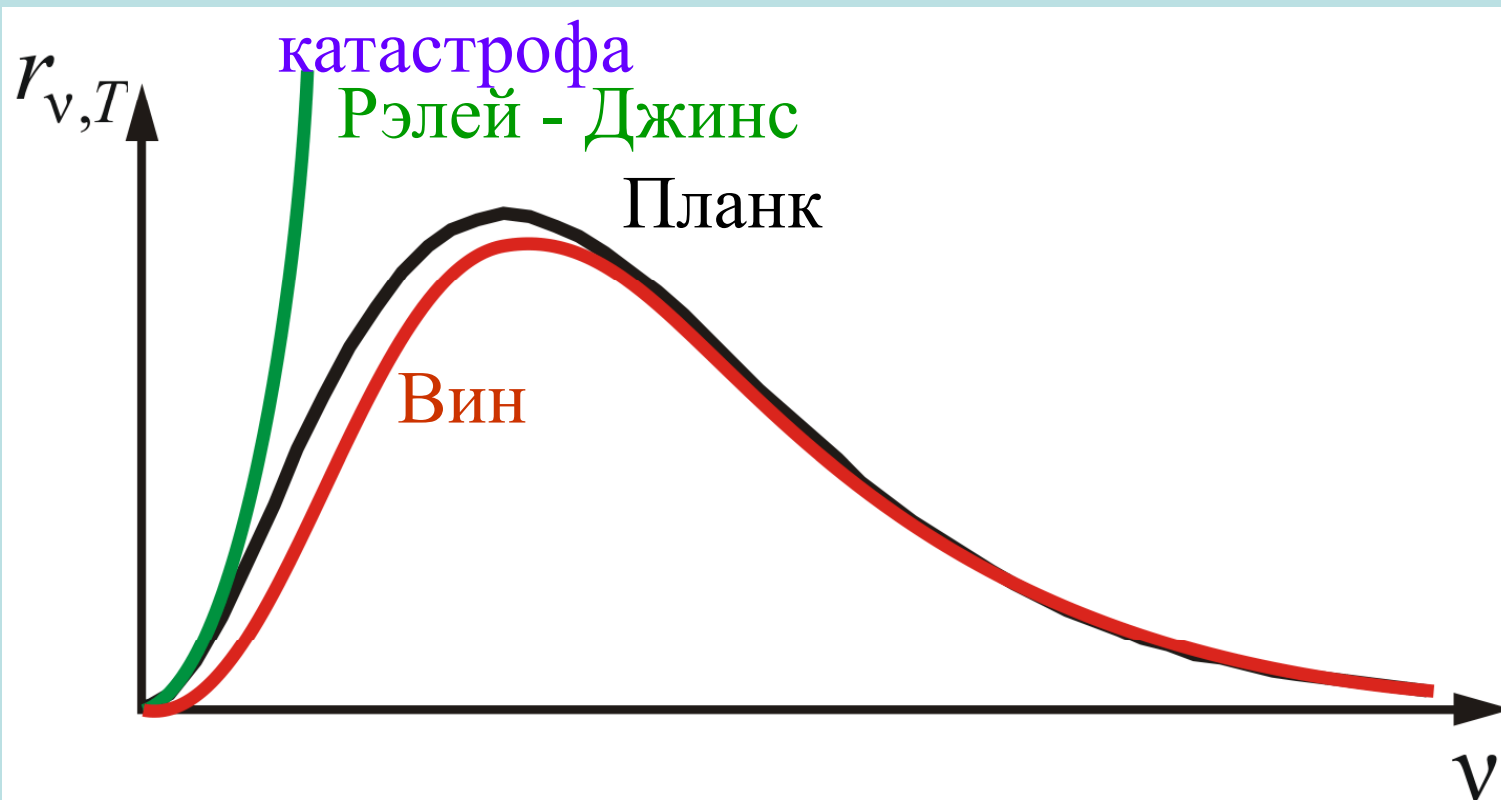
Модель Планка

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \Rightarrow \quad r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

# Формула Планка.

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

Ультрафиолетовая



## Следствия из формулы Планка

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

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

(энергия кванта много меньше энергии теплового движения  $kT$ ):

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



**формула 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**

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad r_{\nu,T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}, \quad r_{\nu,T} = C_1 \nu^3 e^{-\frac{C_2\nu}{T}}$$

3) Легко получается **закон Стефана-Больцмана:**

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu \quad R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad R_e = \sigma T^4$$

Отсюда можно вывести закон **Стефана-Больцмана:**

$$R_e = \sigma T^4,$$

если ввести безразмерную переменную  $x = h\nu/(kT)$ .



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

## Формула Планка

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



*Из формулы Планка, зная универсальные постоянные  $h$ ,  $k$  и  $c$ , можно вычислить постоянную **Стефана-Больцмана**  $\sigma$  и **Вина**  $b$ .*

*С другой стороны, зная экспериментальные значения  $\sigma$  и  $b$ , можно вычислить  $h$  и  $k$  (именно так и было впервые найдено числовое значение постоянной Планка).*



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

Этот день стал ***датой рождения квантовой физики.***

<http://www.youtube.com/watch?v=DKHvG3kvHVc>