

The background of the image is a spiral-bound notebook with a light beige, textured cover. The spiral binding is visible on the left side. The text is written in a bold, green, serif font with a slight shadow effect.

Физика колебаний и волн. Квантовая физика.

Лекция № 8

Экспериментальные основы квантовой физики.

- 1. Ограниченность классической физики. Излучение чёрного тела. Равновесное тепловое излучение.*
- 2. Квантование энергии гармонического осциллятора. Постоянная Планка. Формула Планка для спектральной плотности энергии равновесного теплового излучения.*

Завершение классической физики

В конце XIX в. многие ученые считали, что развитие физики завершилось по следующим причинам:

1. Больше 200 лет существуют законы механики, теория всемирного тяготения.
2. Разработана МКТ (молекулярно-кинетическая теория).
3. Подведен прочный фундамент под термодинамику.
4. Завершена максвелловская теория электромагнетизма.
5. Открыты фундаментальные законы сохранения (энергии, импульса момента импульса, массы и электрического заряда).

Физические проблемы начала XX в.

В конце XIX - начале XX в. открыты:

X-лучи (рентгеновские лучи, В. Рентген),

явление радиоактивности (А. Беккерель),

электрон (Дж. Томсон).

Однако классическая физика не сумела объяснить эти явления.

Теория относительности А. Эйнштейна потребовала коренного пересмотра понятия пространства и времени.

Специальные опыты подтвердили справедливость гипотезы Дж.Максвелла об электромагнитной природе света. Можно было предположить, что излучение электромагнитных волн нагретыми телами обусловлено колебательным движением электронов. Но это предположение нужно было подтвердить сопоставлением теоретических и экспериментальных данных.

Равновесное или черное излучение

В состоянии равновесия процессы испускания и поглощения энергии каждым телом в среднем компенсируют друг друга.

Следовательно: плотность энергии излучения достигает определенного значения, зависящего только от установившейся температуры тел.

Излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, называется *равновесным* или *черным излучением*.

Основное свойство: плотность энергии равновесного излучения и его спектральный состав зависят только от температуры.

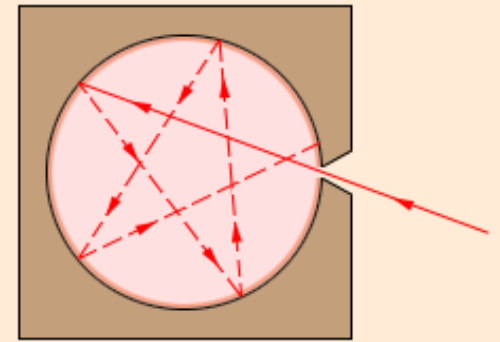
Модель абсолютно черного тела

Абсолютно черное тело –
мысленная *модель тела*

полностью поглощающего
электромагнитные волны любой
длины (и, соответственно, излуча-
ющего все длины электромаг-
нитных волн).

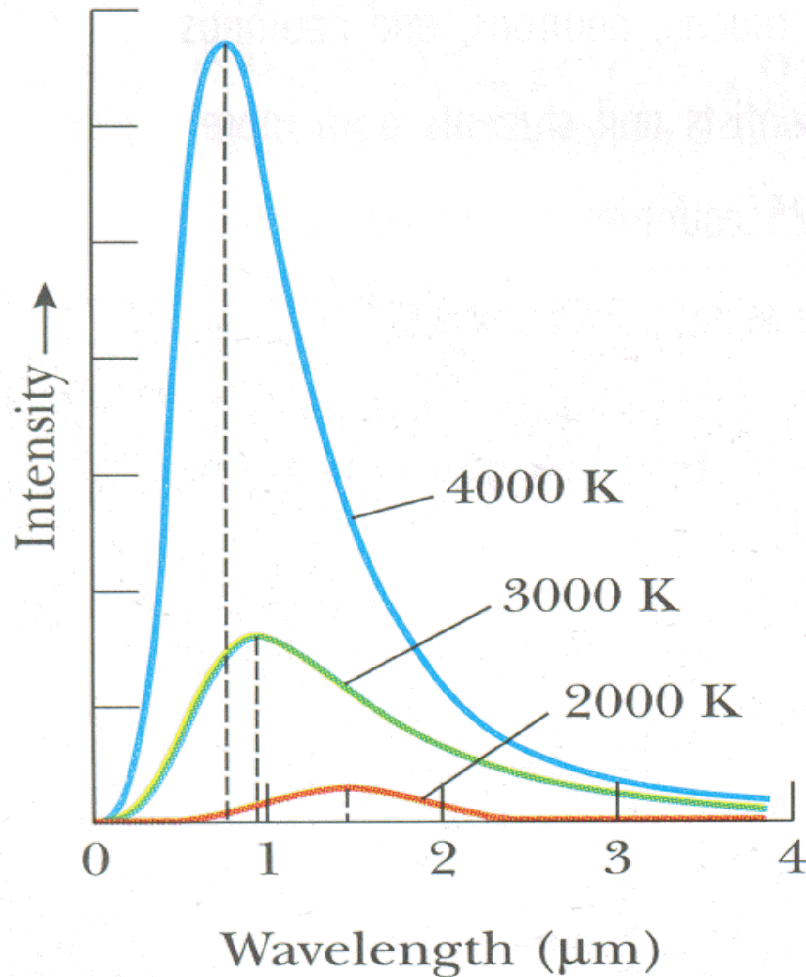
Свойство: при заданной температуре собственное тепловое излучение абсолютно черного тела, находящегося в состоянии теплового равновесия с излучением, должно иметь тот же спектральный состав, что и окружающее это тело равновесное излучение.

Проблема сводится к изучению спектрального состава излучения абсолютно черного тела. Решить эту проблему классическая физика оказалась не в состоянии.



Модель абсолютно
черного тела –
небольшое отверстие в
замкнутой полости

Спектры излучения



Типы спектров:
непрерывные

Основная проблема –
понять наблюдаемое
распределение
излучения
испускаемого
черным телом по
длинам волн.

Излучение абсолютно черного тела.
Непрерывный спектр.

**Отношение испускательной к
поглощательной способности не зависит
от природы тела, оно является для всех
тел одной и той же универсальной
функцией частоты и температуры:**

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

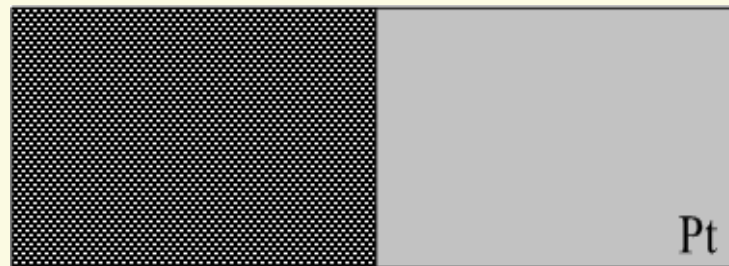
— универсальная функция Кирхгофа

**Сажа или платиновая чернь
имеют поглощающую способность**

$$\alpha_{\omega, T} \approx 1$$

Согласно закону Кирхгофа зачерненная часть платиновой пластинки при нагревании светится ярче, чем не зачерненная.

Тело, которое при данной температуре лучше испускает волны какой-либо длины, должно их и лучше поглощать.



Низкая температура

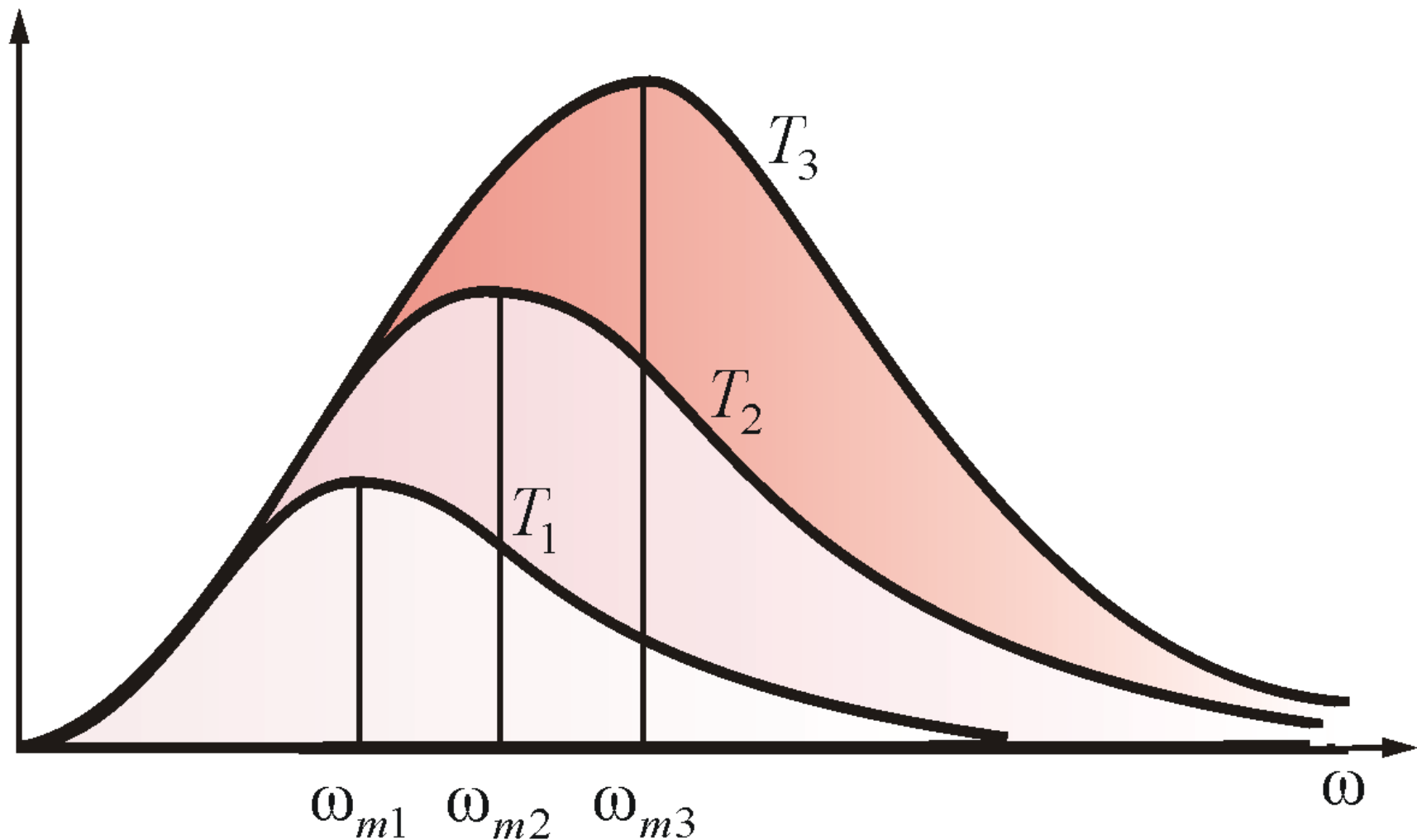


Высокая температура



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

$$r_{\omega, T} = f(\omega, T)$$

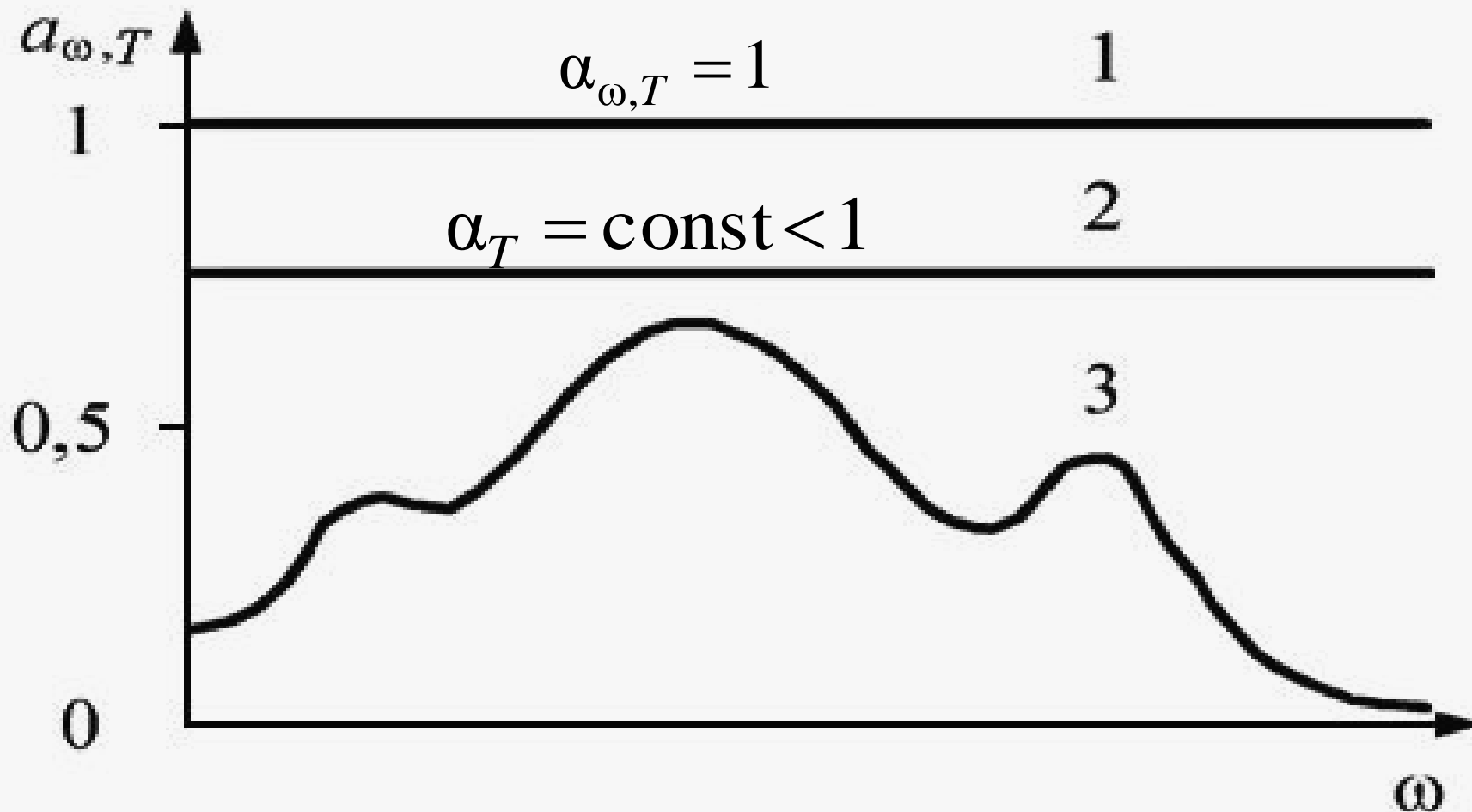


По определению $\alpha_{\omega, T}$ не может быть больше единицы.

Тело, у которого $\alpha_{\omega, T}$ меньше единицы и одинакова по всему диапазону частот, называют *серым телом*.

Тело, у которого $\alpha_{\omega, T}$ равно единицы-абсолютно черное тело.

Реальное тело всегда отражает часть энергии падающего на него излучения.



Спектральная поглощательная способность тела:

1 – абсолютно черное тело; 2 – серое тело;

3 – реальное тело всегда отражает часть энергии падающего на него излучения.

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 физики. Вывел основное кинетическое уравнение газов, являющееся основой физической кинематики. Впервые применил к излучению принципы термодинамики.

Позднее Больцман, применив термодинамический метод к исследованию черного излучения, показал, что это справедливо только для *абсолютно черного тела*.

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

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

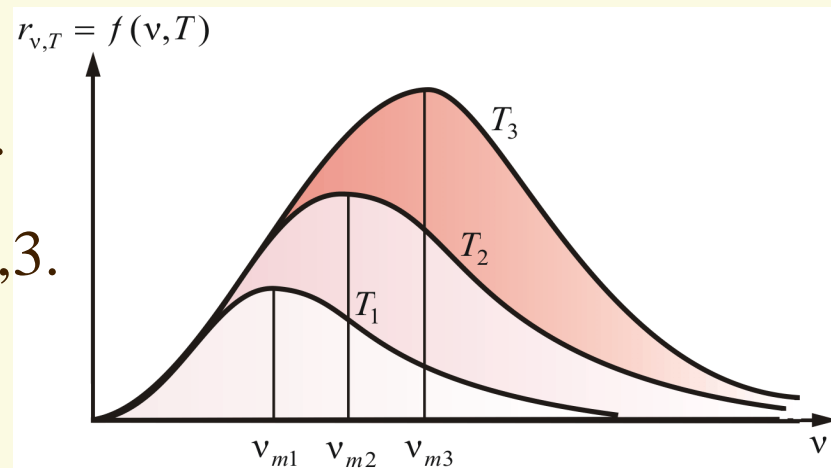
$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ — пост. Стефана —
Больцмана.

R - суммарная энергия, излучаемая телом на
всех длинах волн (интегральная
энергетическая светимость тела)

$$0 \leq k \leq 1,$$

k — коэффициент нечёрности.

Например, для человека $k = 0,3$.
Для чёрного тела $k = 1$.



Оценить, какую мощность излучает средних размеров студент МГТУ “Станкин”. Решение.

Дано:	Энергетическая светимость нагретого тела
$k = 0,3$	определяется законом Стефана – Больцмана:

$T = 36,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$R = k\sigma T^4.$$

Энергетическая светимость есть P - ? мощность излучения, испускаемого с единицы площади поверхности тела. Нужно оценить площадь поверхности средних размеров студента.

Площадь поверхности среднего студента (площадь шкурки) может составить $S \approx 2 - 2,5 \text{ м}^2$.

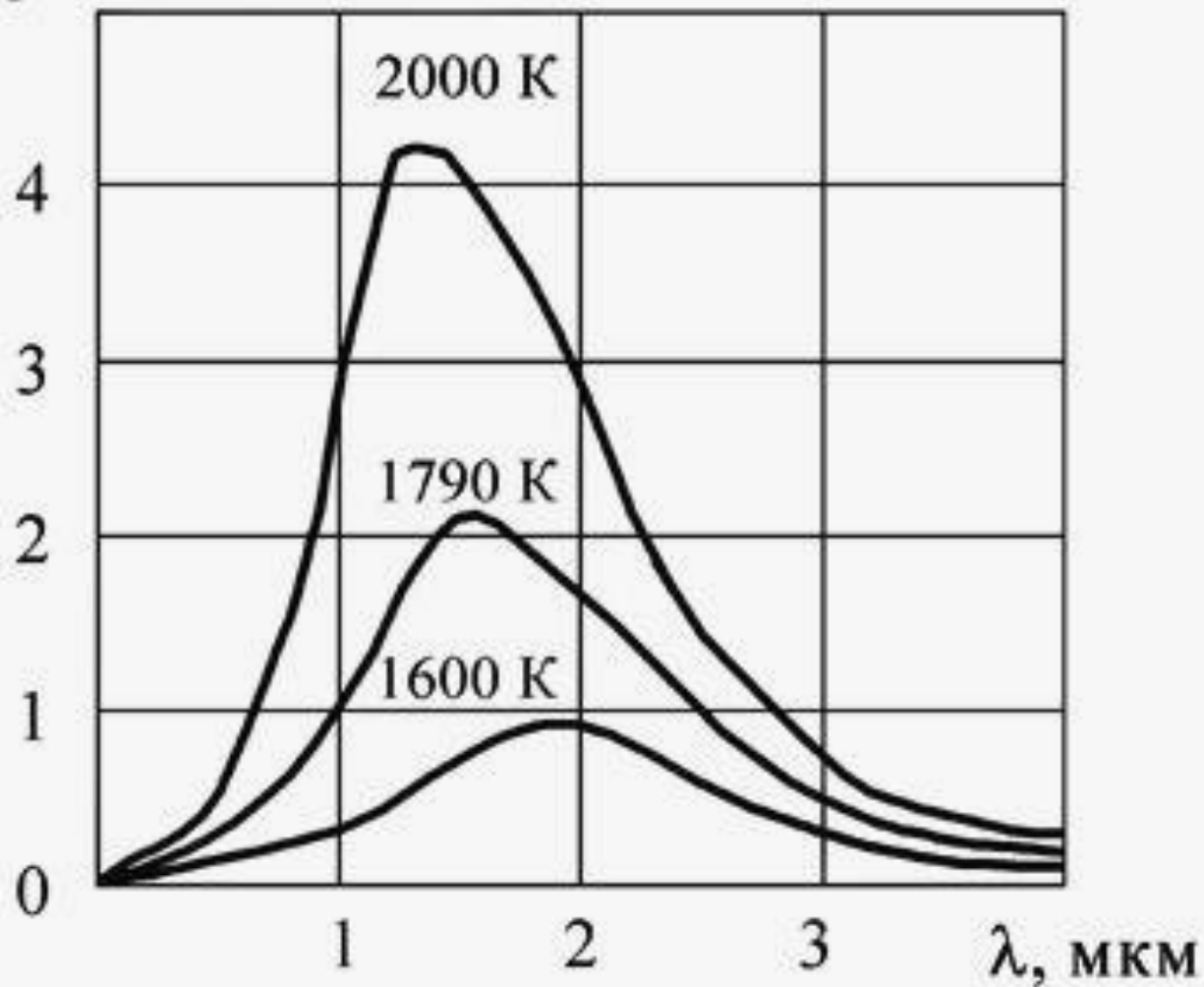
Из литературы известно, что «коэффициент серости» составляет $k = 0,3$. $P = RS = k\sigma T^4 S$.

$$P = k\sigma T^4 S = 0,3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 310^4 \cdot 2,5 \approx 400 \text{ (Вт)}.$$

Ответ: 0,4 кВт.

Внимание!! Экономия на отоплении составляет при нынешних расценках на электроэнергию (5,38 руб./кВт·ч) 51 руб. 65 коп. в сутки или 1549 руб. 44 коп в месяц.

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

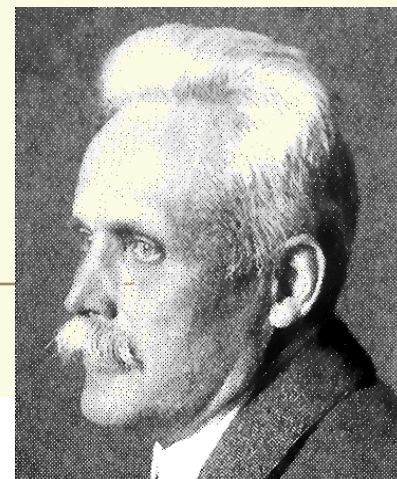


*Спектральная излучательная способность абсолютно
черного тела*

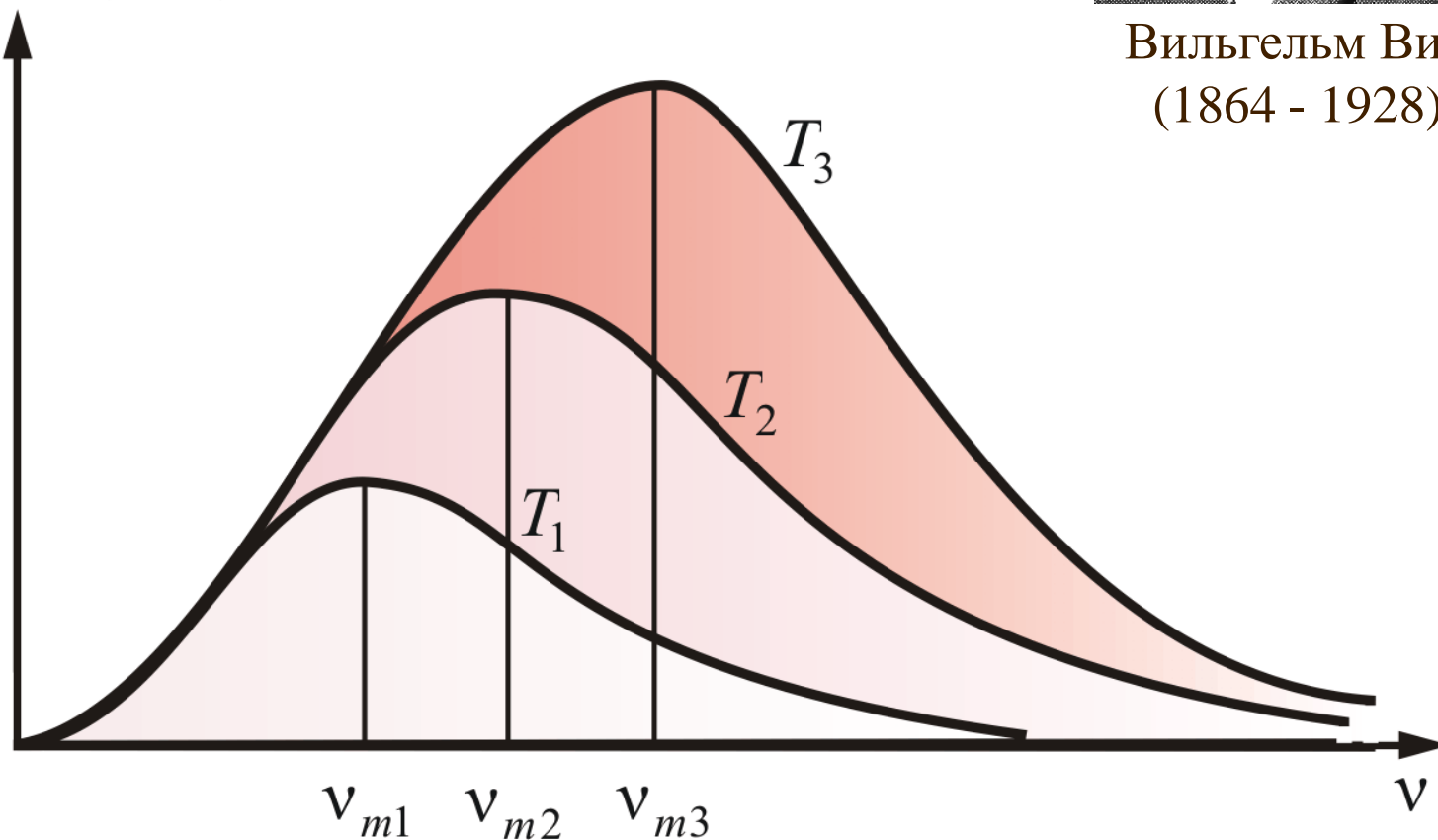
$$\frac{\nu_{\max}}{T} = b \quad \text{Закон смещения Вина}$$

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

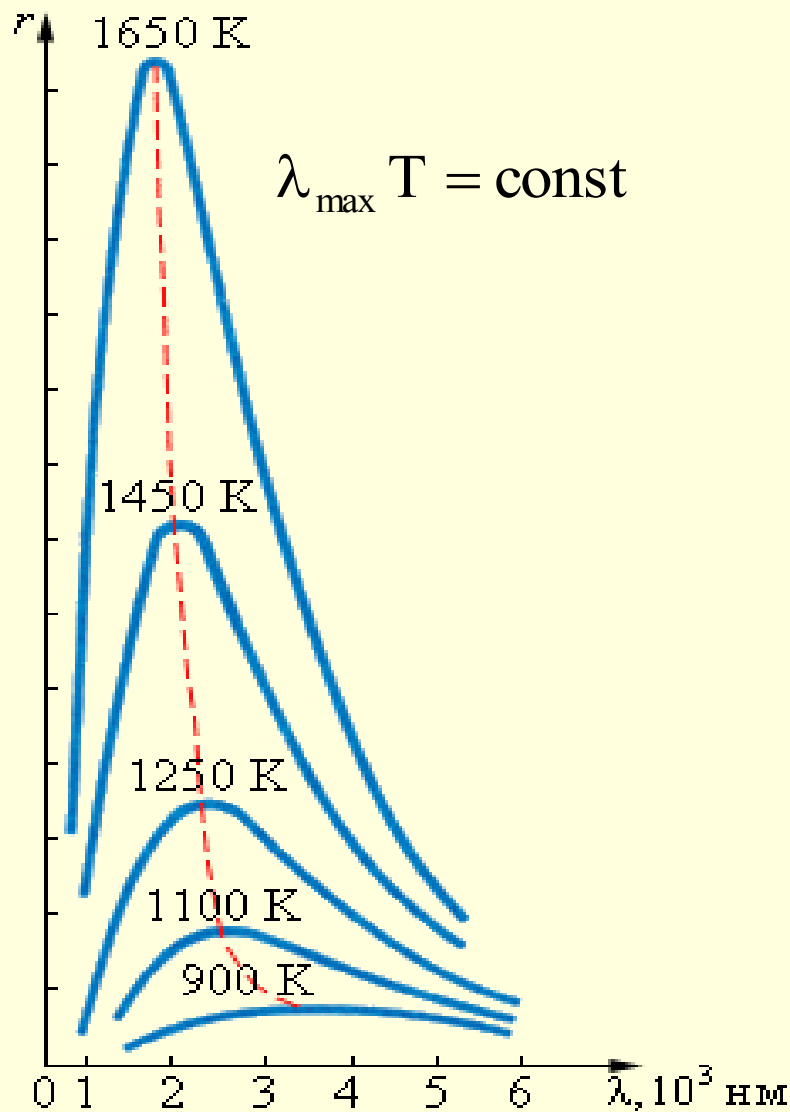
$$r_{\nu,T} = f(\nu, T)$$



Вильгельм Вин
(1864 - 1928)



Пример экспериментально полученных кривых распределения энергии в спектре излучения черного тела.



При заданном значении температуры T интенсивность излучения черного тела максимальна и соответствует определенному значению длины волны λ .

Закон В. Вина: при изменении температуры длина волны, на которую приходится максимальная энергия, убывает обратно пропорционально температуре,

Используя законы термодинамики, В.Вин получил закон распределения энергии в спектре черного тела, который совпадал с экспериментальными результатами лишь в области больших частот.

Формула Рэля-Джинса



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

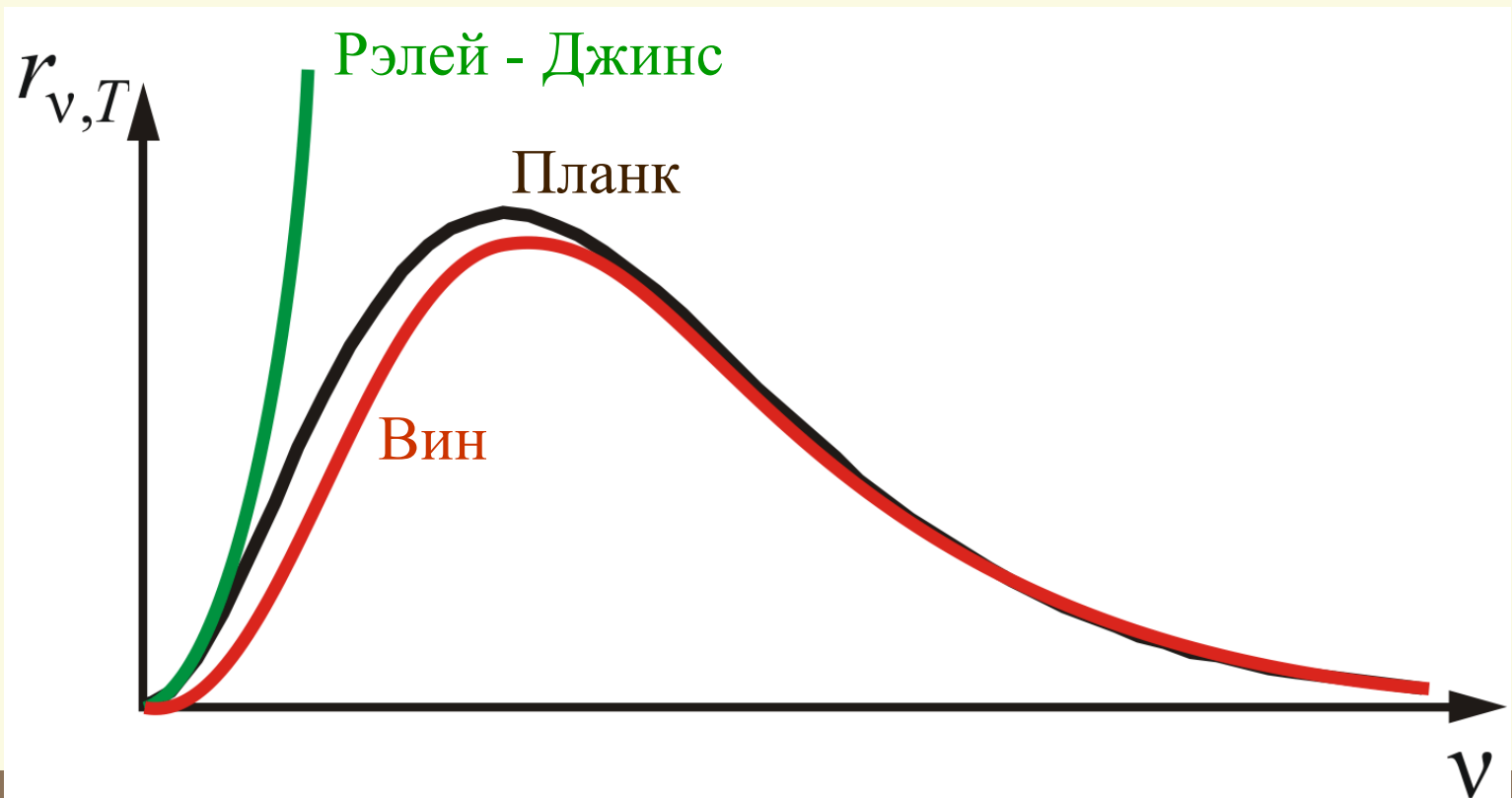
Заложил основы теории молекулярного рассеяния света, объяснил голубой цвет неба. Сконструировал рефрактометр (рефрактометр Рэля). *Рассмотрел равновесное излучение в замкнутой полости с зеркальными стенками как совокупность стоячих электромагнитных волн (осцилляторов).*



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 окончательно получил испускательную способность:

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



Энергетическая светимость нагретого тела:

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

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

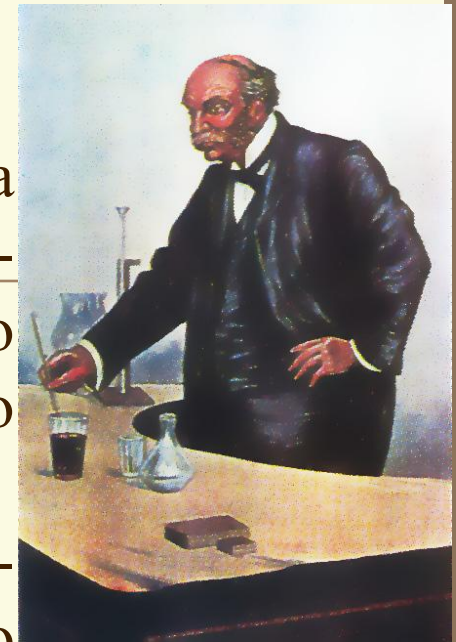


Теория Рэля и Джинса

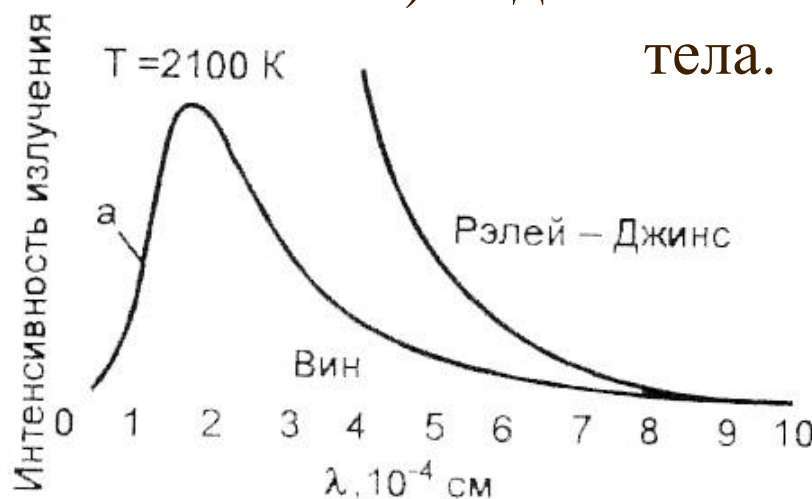


Джеймс
Хопвуд Джинс
(1877 - 1946)

Теория Рэля и Джинса основывалась: 1) на классическом предположении о равномерном распределении энергии по степеням свободы; 2) условия теплового равновесия нагретого тела с его излучения; 3) модели абсолютно черного тела.

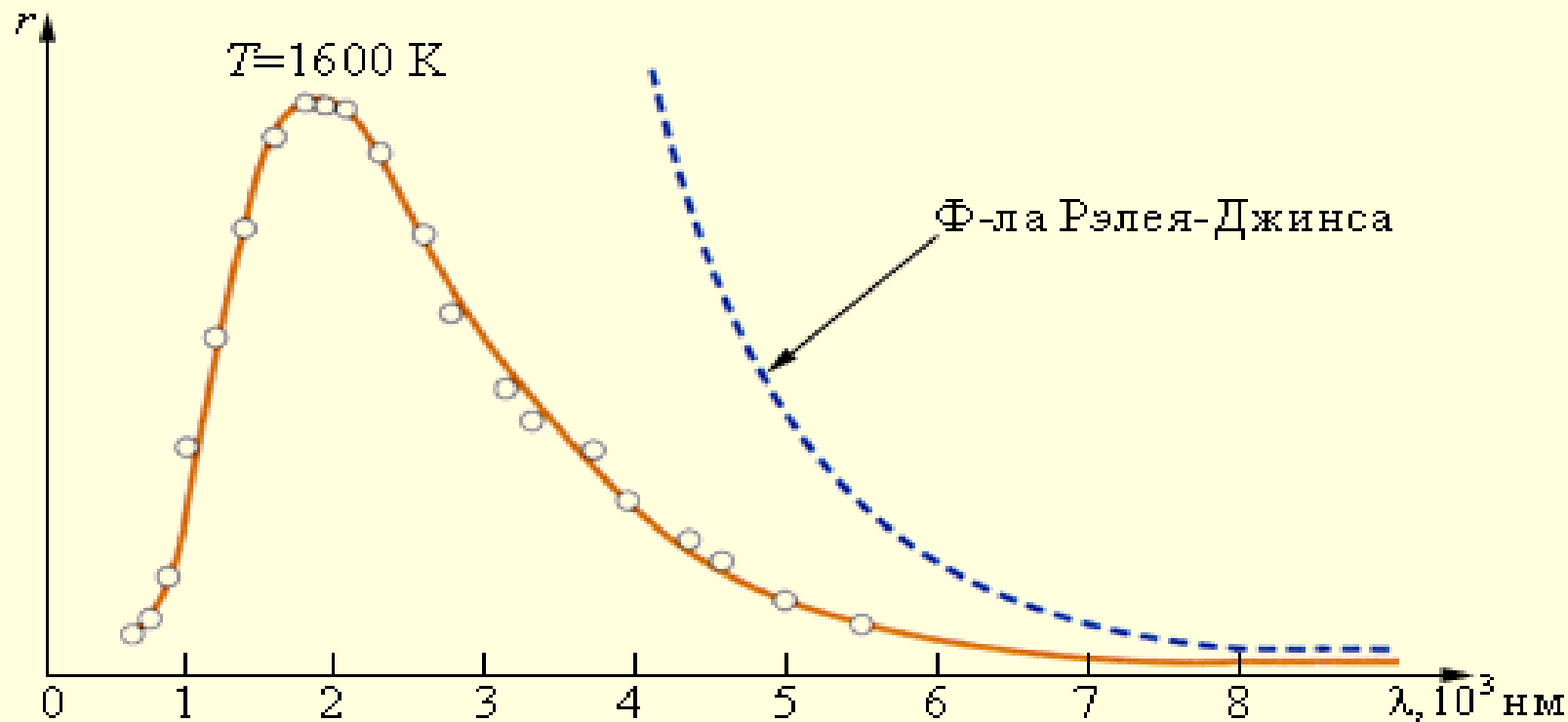


Джон Уильям
Стретт (Лорд
Рэлей)
(1842 - 1919)



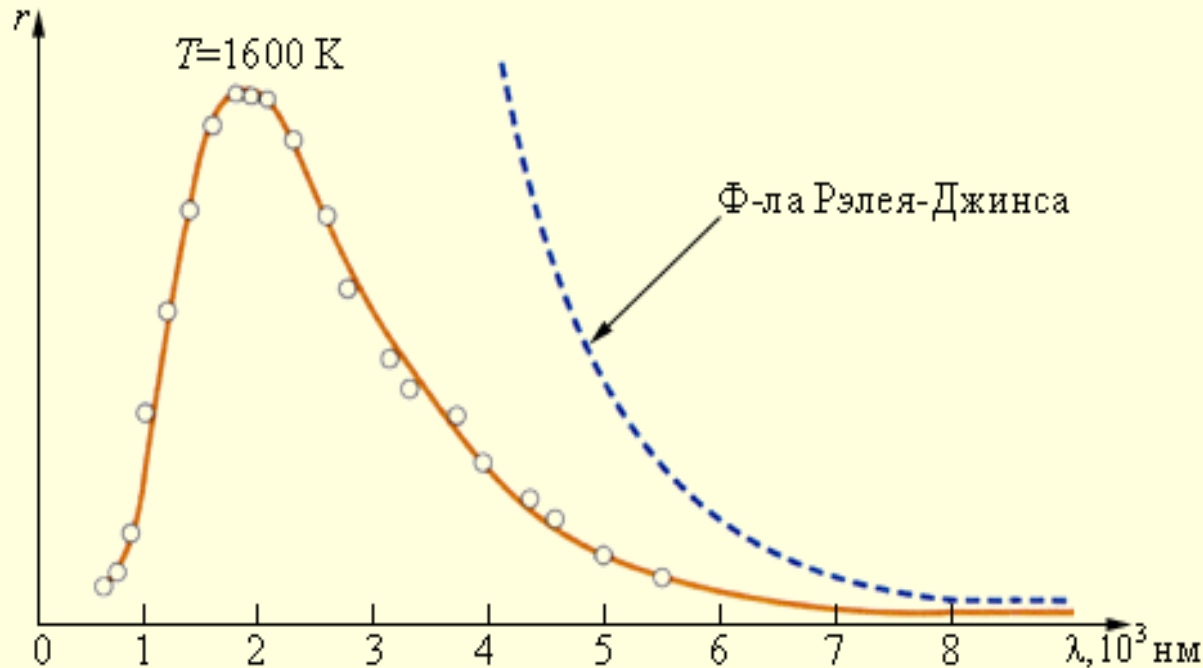
Результат:
согласие с экспериментом наблюдается только для длинных волн. Эта ситуация была названа «ультрафиолетовой катастрофой».

Закон Рэля - Джинса



Английский физик Дж. Рэлей сделал попытку более строгого теоретического вывода закона распределения энергии, но закон приводил к хорошему совпадению с опытами в области малых частот или больших длин волн.

Закон Рэлея - Джинса

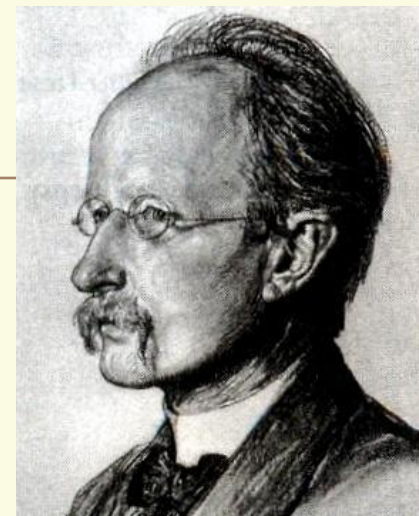


По этому закону
интенсивность
излучения должна
возрастать
пропорционально
квадрату частоты.

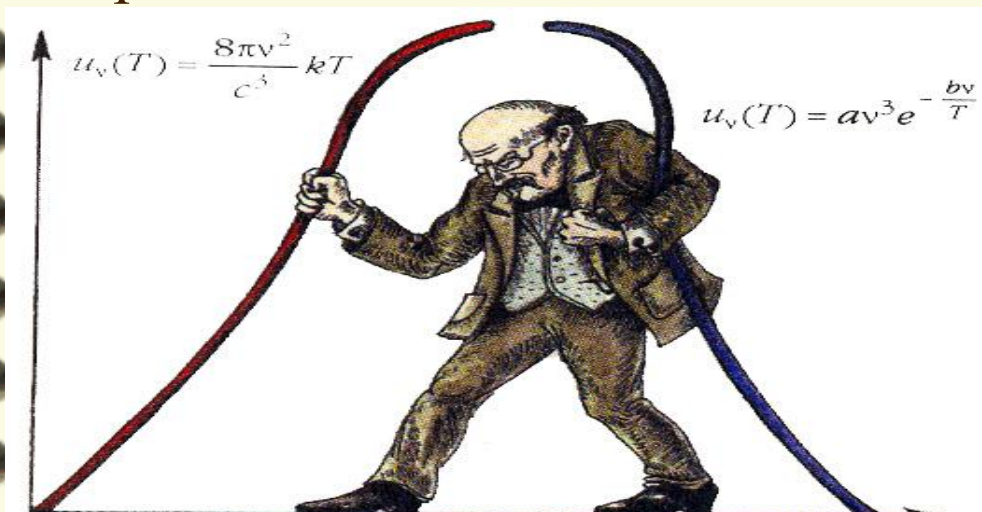
Следовательно, в тепловом излучении должно быть много ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, чего на опыте не наблюдалось. Затруднения в согласовании теории с результатами эксперимента получили название ультрафиолетовой катастрофы.

Квантовая гипотеза Планка

Для получения правильной зависимости спектральной плотности излучения от длины волны Планку пришлось отказаться в теории Рэлея и Джинса от классического предположения о равномерном распределении энергии по степеням свободы, а также предположить, что энергия может испускаться только порциями - квантами. Величина такой минимальной порции энергии: $E = h\nu$.



Макс Планк
(1858 - 1947)



Постоянная Планка
 $h = 6,626122 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

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.

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

$$E_n = nh\nu$$

Минимальная порция энергии:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

$$\left. \begin{array}{l} h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ \hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{квант действия -} \\ \hbar = h / 2\pi \\ \omega = 2\pi\nu \end{array}$$

постоянная Планка.

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

Формула Планка



Из формулы Планка

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

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

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

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

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

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:**

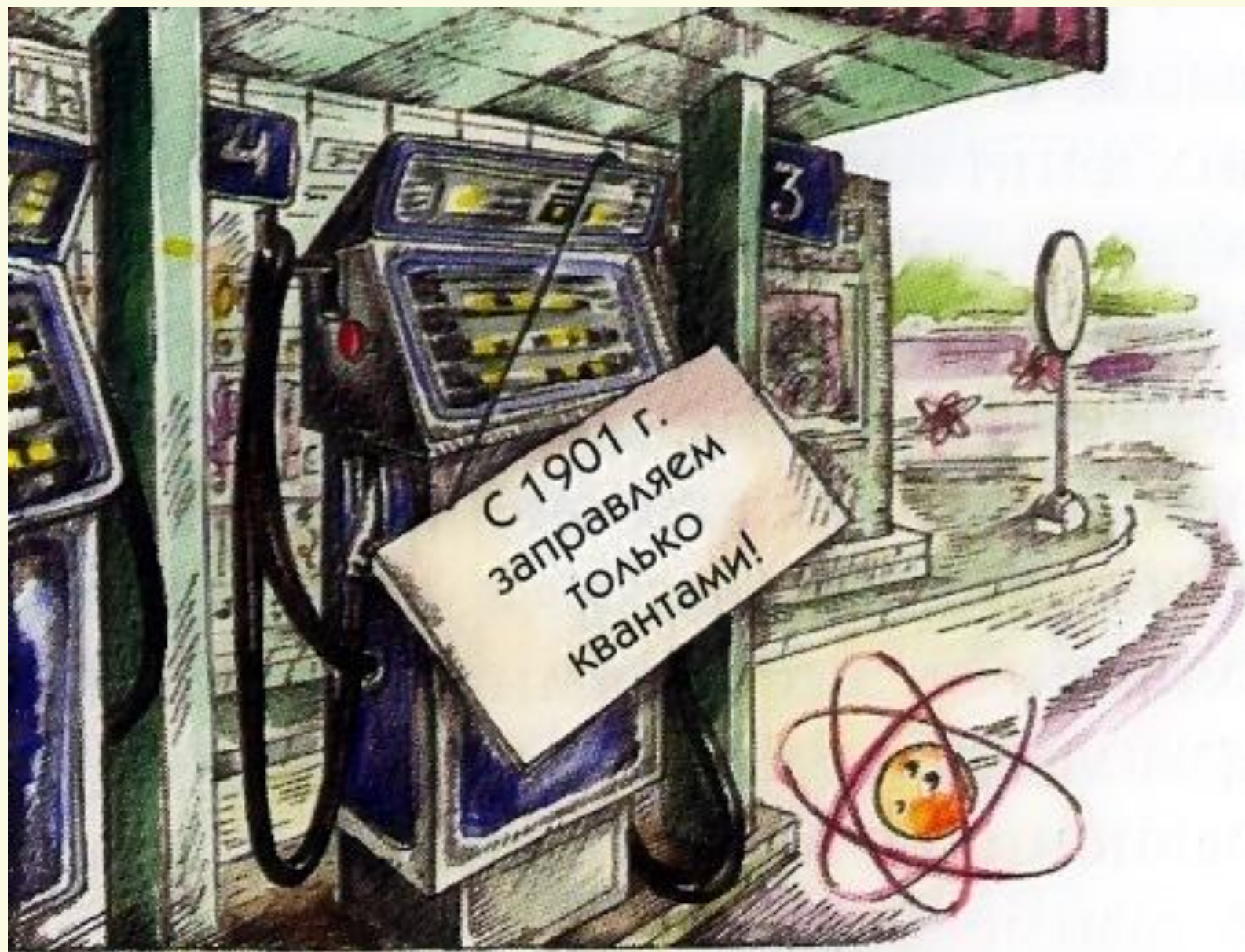
$$R = \sigma T^4$$

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).



Теоретически вывод этой формулы М. Планк изложил **14 декабря 1900 г.** на заседании Немецкого физического общества. Этот день стал ***датой рождения квантовой физики.***





ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!