

# ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

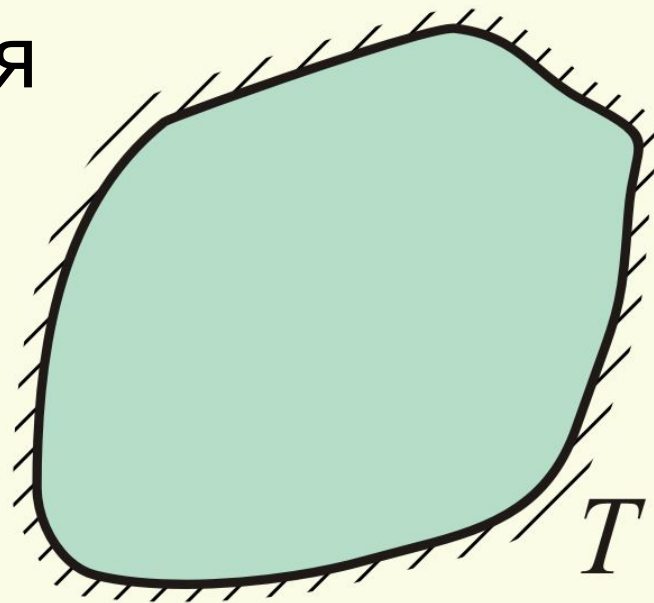
## *лекция 5*

# §§ Равновесное излучение

Рассмотрим полость, температура стенок которой поддерживается постоянной.

В начальный период времени полость будет заполнена излучением

**с характерным** для материала полости спектром



За счет частичного поглощения, за счет хаотического теплового движения, атомы полости переходят в возбужденное состояние и излучают.

При этом происходит изменение интенсивности, спектрального состава, состояния поляризации света.

Система постепенно переходит в состояние равновесия, которому соответствует **наибольшая вероятность**.

Это излучение называется **равновесным**.

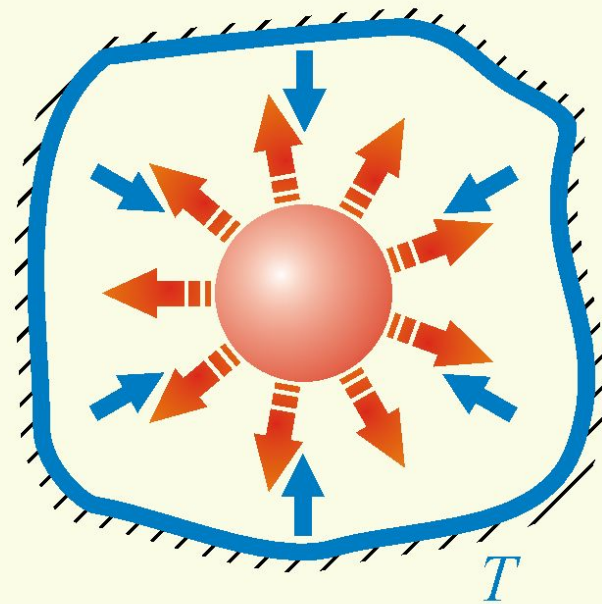
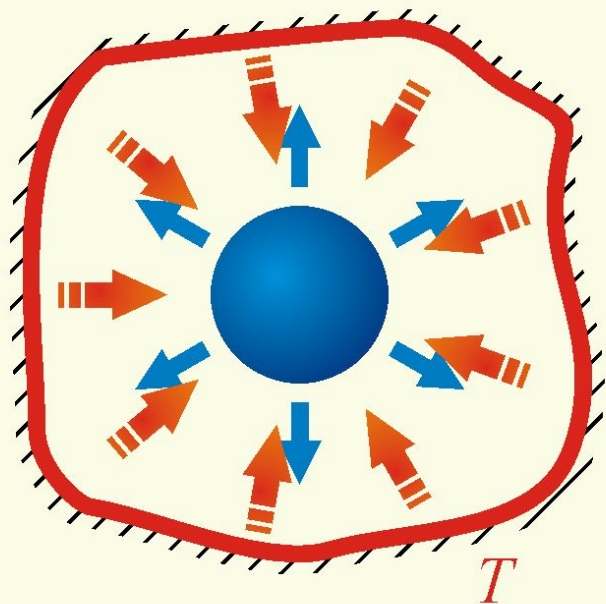
Оно однородно, изотропно и деполяризовано.

Спектральный состав и другие характеристики не зависят от свойств материала стенок полости (и тел внутри нее), а определяются только температурой стенок

Излучение также можно характеризовать этой температурой и считать ее свойством самого излучения, которое также называется **ТЕПЛОВЫМ**.

Только тепловое излучение может быть равновесным.

Интенсивность теплового излучения **возрастает** при повышении температуры.



При нарушении равновесия между телом и излучением, тело либо поглощает больше, чем излучает (т.е. нагревается), либо излучает, за счет убыли внутренней энергии (охлаждается).

# §§ Характеристики излучения

## Потоком (мощностью) излучения

называется количество энергии, переносимой ЭМ волнами, за единицу времени со всей площади тела

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad [\Phi] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1$$

Это, например, та мощность, которую указывают на лампе или нагревателе

# Энергетической светимостью

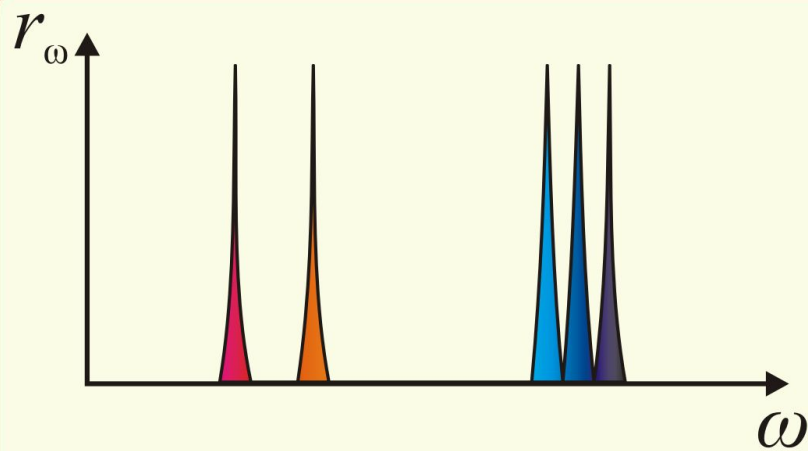
называется величина, равная мощности теплового излучения с единицы площади тела.

$$R = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$$

$$[R] = 1 \text{ Вт/м}^2$$

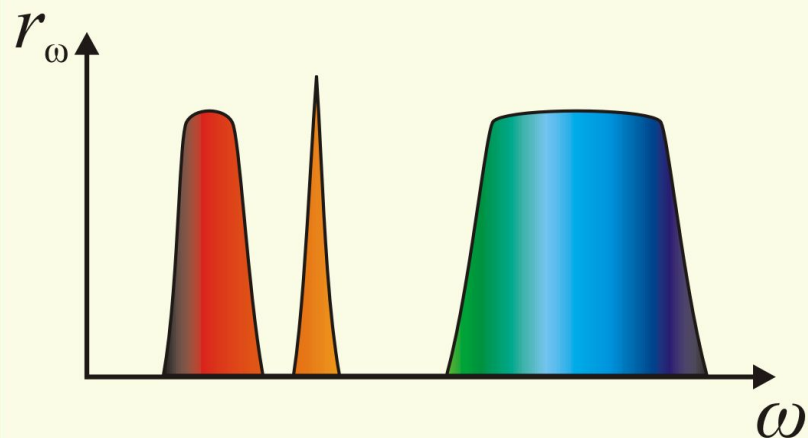
Эти величины – **интегральные**, т.е. учитывают энергию, переносимую волнами всех частот (длин волн)

Рассмотрим **спектры** – распределение энергии по частотам (по длинам волн)



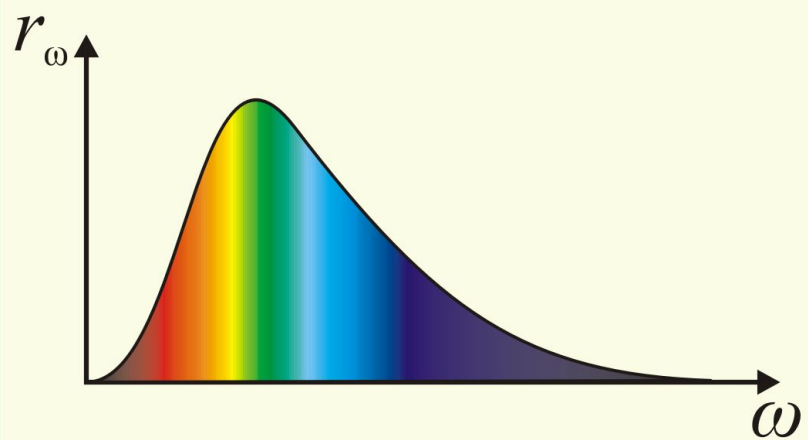
## линейчатый спектр

уединенные атомы,  
разряженные газы



## полосатый спектр

конденсированное  
вещество



## сплошной спектр

равновесное  
(тепловое) излучение

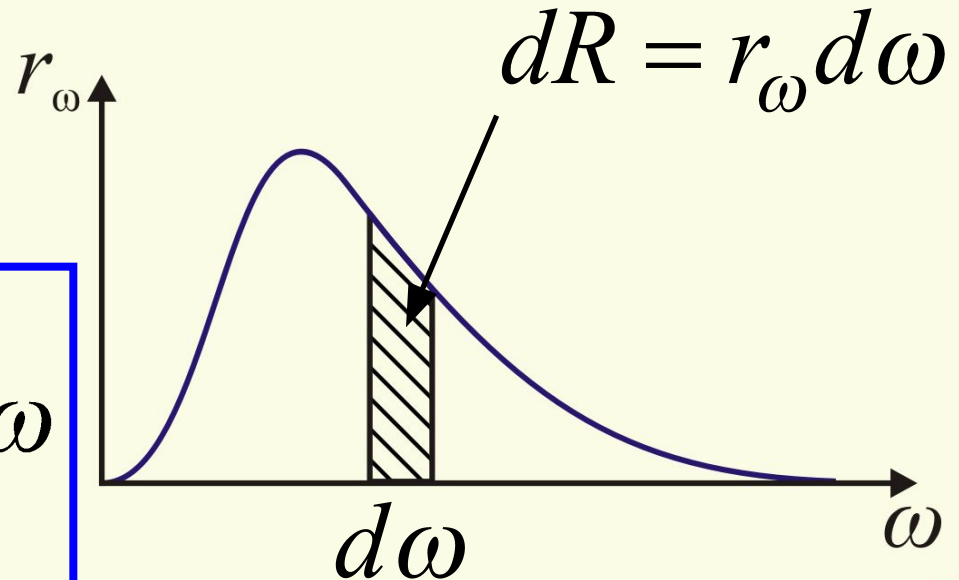


# Испускательная способность –

величина, равная спектральной  
плотности энергетической светимости

Это энергия, излучаемая телом в  
единицу времени с единицы площади  
в единичном интервале длин волн  
(частот)

$$r_{\omega}(\omega, T) = \frac{dR}{d\omega}$$



$$R(T) = \int_0^{\infty} r_{\omega}(\omega, T) d\omega$$

# §§ Поглощательная способность

Рассмотрим элементарную площадку и интервал частот излучения  $[\omega, \omega + d\omega]$

Пусть

$d\Phi_{\omega}$  – падающий поток

$d\Phi'_{\omega}$  – поглощаемая мощность

тогда безразмерная величина

$$A(\omega, T) = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}} \leq 1$$

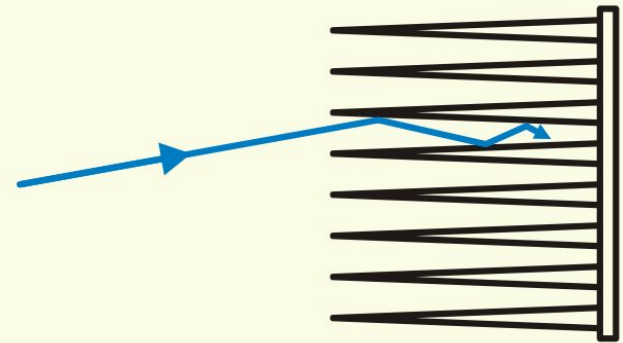
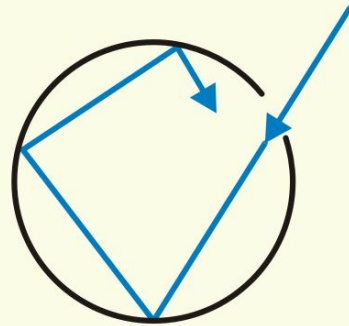
называется

**поглощательной**  
**способностью**

Эта величина зависит  
от природы тела,  
температуры,  
состояния поверхности,  
частоты падающего излучения.

Для **абсолютно черного тела (АЧТ)**

$$A(\omega, T) = 1$$

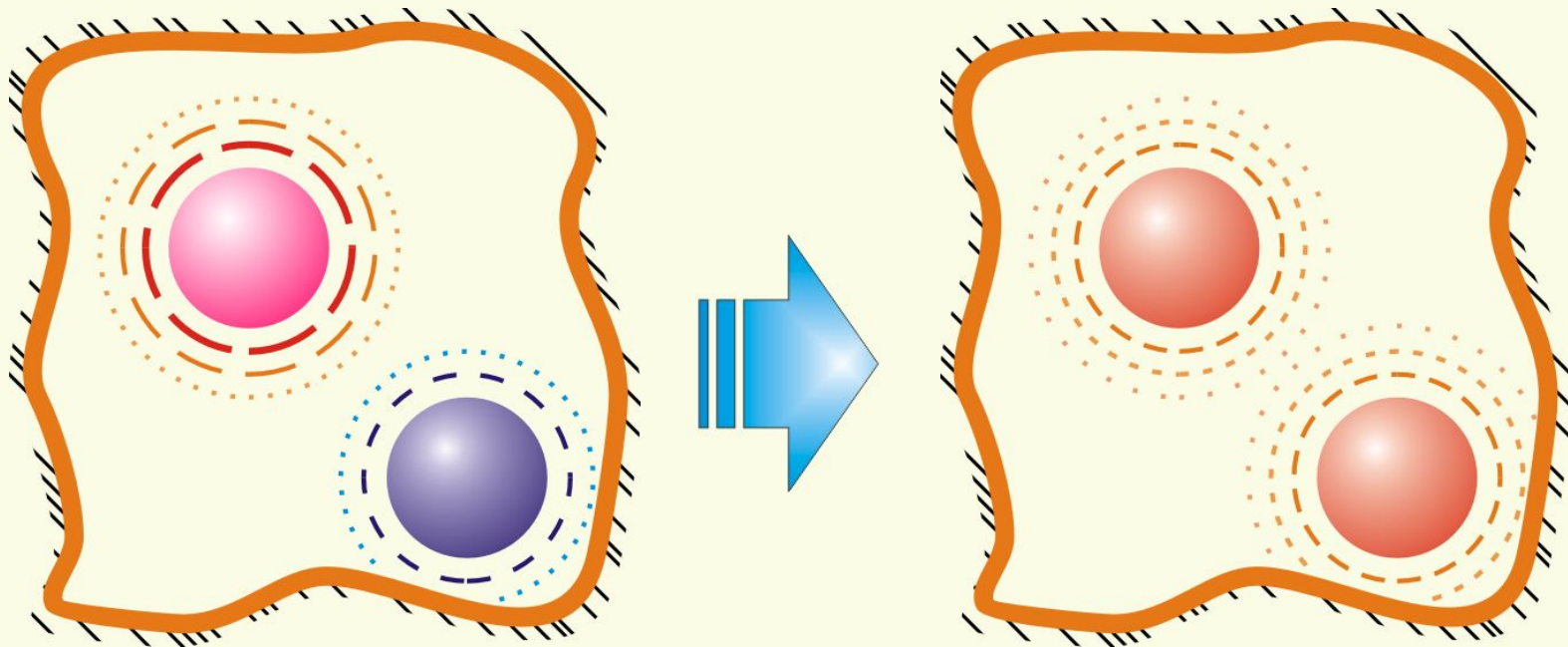


Тело называют **серым**, если

$$A(\omega, T) = A(T) < 1$$

# §§ Закон Кирхгофа

Рассмотрим два тела в замкнутой полости



В этой системе устанавливается **динамическое равновесие** – оба тела будут иметь одинаковую температуру.

Если тело обладает большей излучательной способностью, то оно теряет на излучение больше энергии и, для поддержания температуры, такое тело должно больше поглощать.

$$\frac{r(\omega, T)}{A(\omega, T)} = f(\omega, T)$$

**Кирхгоф, 1859**

$f(\omega, T)$  – **универсальная** функция Кирхгофа или испускательная способность абсолютно черного тела.

# §§ Закон Стефана-Больцмана

Стефан, 1879, опытные данные

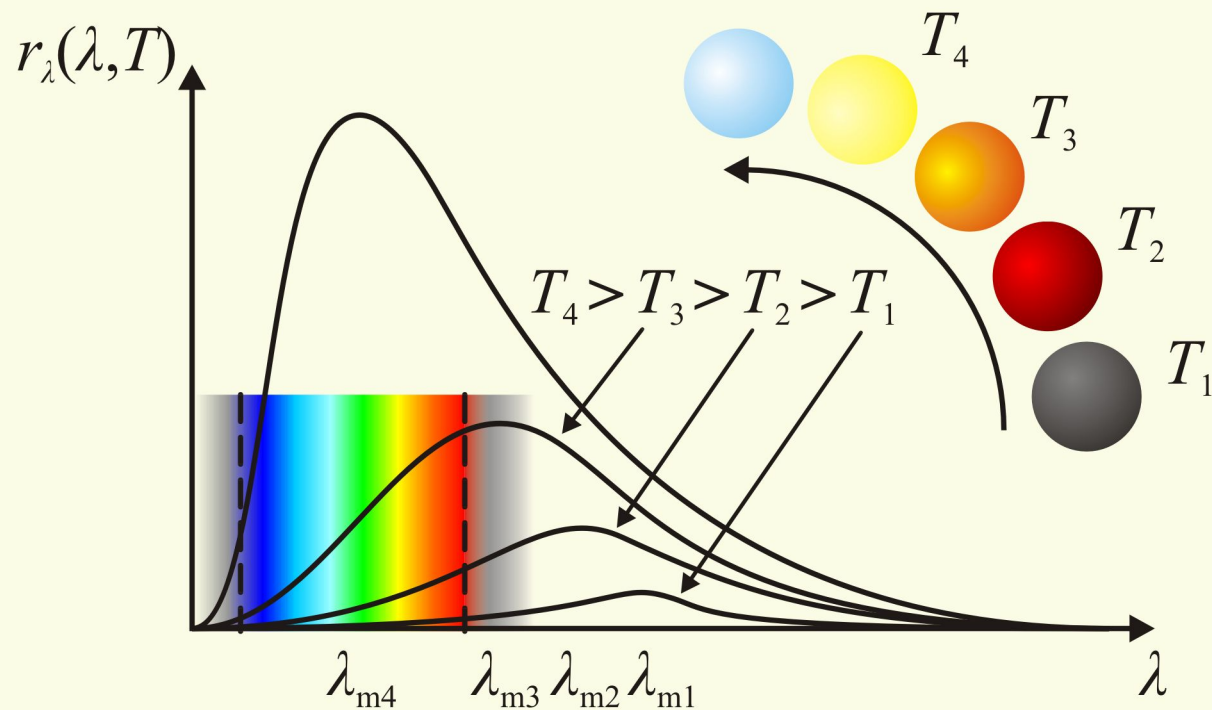
$$R = \text{const} \cdot T^4 \text{ – для любого тела}$$

Больцман, 1884, теоретический расчет

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega}(\omega, T) d\omega = \sigma T^4 \quad \text{– только для АЧТ}$$

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

# §§ Закон смещения Вина



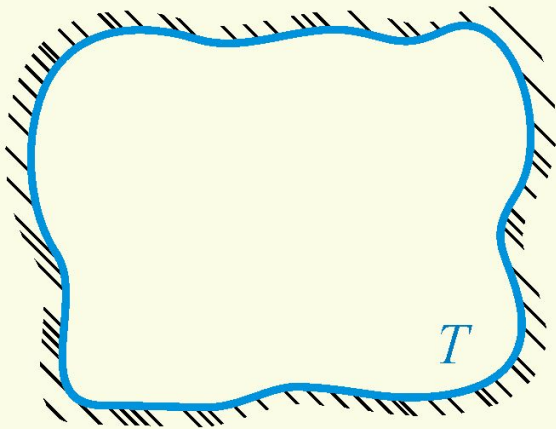
длина волны  $\lambda_m$ , соответствующая максимуму, определяется соотношением

$$\lambda_m T = b$$

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

# §§ Формула Рэля–Джинса

Рассмотрим, следуя Рэлю (1900) и Джинсу (1905), вывод выражения для спектральной плотности излучения в полости.



Пусть  $T = \text{const}$   
Полная энергия теплового  
(равновесного) излучения:

$$W = W(T)$$

объемная плотность  
энергии ЭМВ

$$U = \frac{W}{V} = U(T)$$



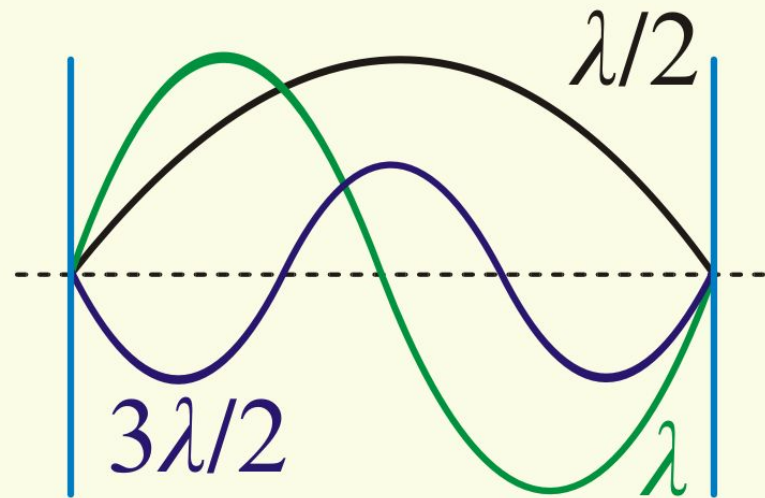
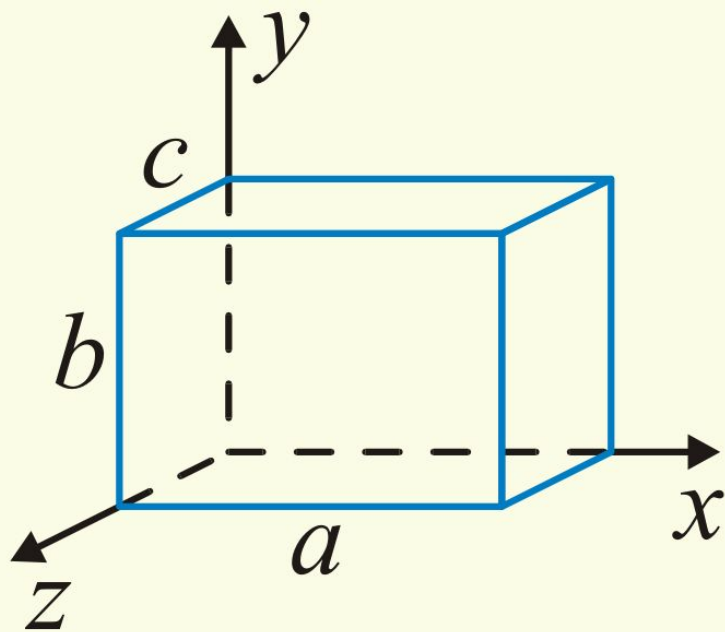
Энергия ЭМВ распределена по частотам неравномерно

$$U(T) = \int_0^{\infty} u(\omega, T) d\omega$$

$u(\omega, T) d\omega$  – энергия, приходящаяся на интервал частот  $[\omega, \omega + d\omega]$

Предположим, что равновесное излучение в полости представляет собой систему стоячих волн.

Пусть поверхность стенок – зеркальная, а форма полости – параллелепипед со сторонами  $a$ ,  $b$  и  $c$ .



$$a = m_x \frac{\lambda}{2} = m_x \frac{\pi}{k_x} \quad m_x = 1, 2, 3 \dots$$

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{волновое число}$$

для осей  $y$  и  $z$  аналогично

$\vec{k} = \{k_x, k_y, k_z\}$  – волновой вектор  
для встречных волн:  $k, -k$

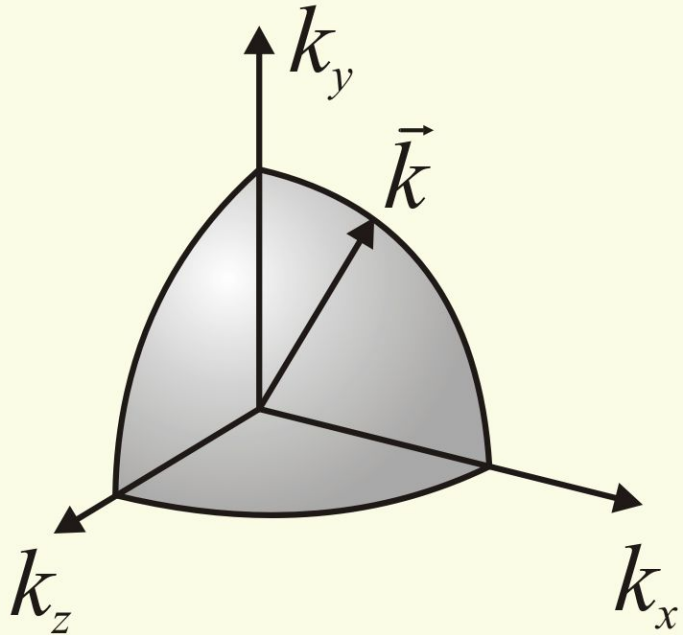
Модуль волнового вектора:

$$|\vec{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

$$= \sqrt{\left(m_x \frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(m_y \frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(m_z \frac{\pi}{c}\right)^2}$$

Каждой тройке  $m_x, m_y, m_z$  соответствует  
своя стоячая волна.

Вычислим приблизительное число таких волн  $N$  в зависимости от  $k$ .



$$V_0 = \frac{1}{8} \left[ \frac{4}{3} \pi k^3 \right]$$

– объем, занимаемый всеми состояниями в  $k$ -пространстве

$$V_1 = \frac{\pi^3}{a \cdot b \cdot c} \quad \text{– объем одного состояния}$$

## Число состояний

$$N = \frac{V_0}{V_1} = \frac{a \cdot b \cdot c \cdot \omega^3}{6\pi^2 c^3} = \frac{V \omega^3}{6\pi^2 c^3}$$

следовательно, число волн в интервале  $[\omega, \omega + d\omega]$  равно

$$dN = \frac{dN}{d\omega} d\omega = \frac{V \omega^2}{2\pi^2 c^3} d\omega$$

Учтем независимость двух состояний поляризации (умножим на 2):

$$dN = \frac{V}{\pi^2} \cdot \frac{\omega^2}{c^3} d\omega$$

энергия, приходящаяся на интервал частот  $[\omega, \omega + d\omega]$

$$u(\omega, T)d\omega = \langle \varepsilon \rangle \frac{dN}{V},$$

$\langle \varepsilon \rangle$  – средняя энергия одного колебания

Из закона Больцмана следует, что на каждую степень свободы приходится

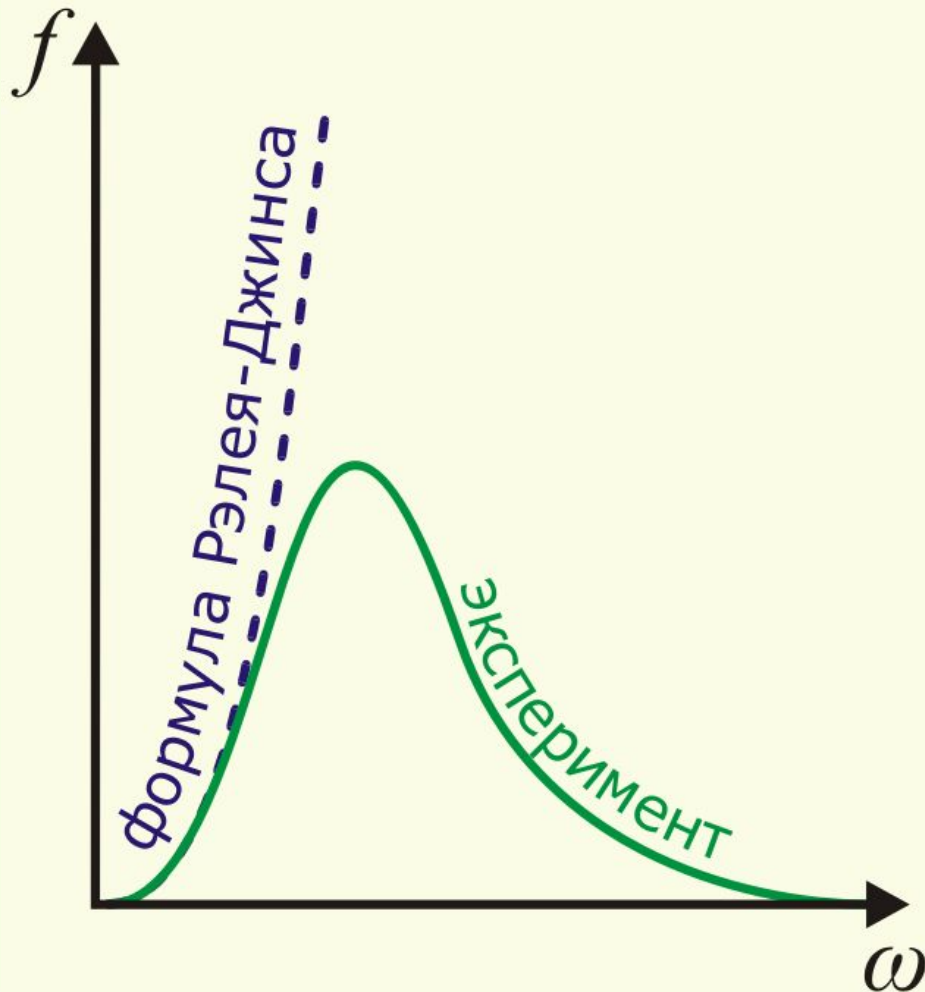
одинаковая энергия  $\frac{1}{2}k_B T$ ,

а на колебательную степень свободы –

энергия  $k_B T$ .

# формула Рэля-Джинса

$$f(\omega, T) = \frac{c}{4} u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} k_B T$$



В области  
низких частот  
(СВЧ, радиоволны  
и дальняя ИК)  
она **прекрасно**  
согласуется с  
экспериментом

Однако,

$$\int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega \rightarrow \infty, \text{ а не к } \sigma T^4$$

и полученное выражение **не описывает**

- 1) равновесие между телом и излучением
- 2) уменьшение спектральной плотности для высоких частот



# §§ Формула Планка

Спектральная плотность энергетической светимости

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \langle \varepsilon \rangle$$

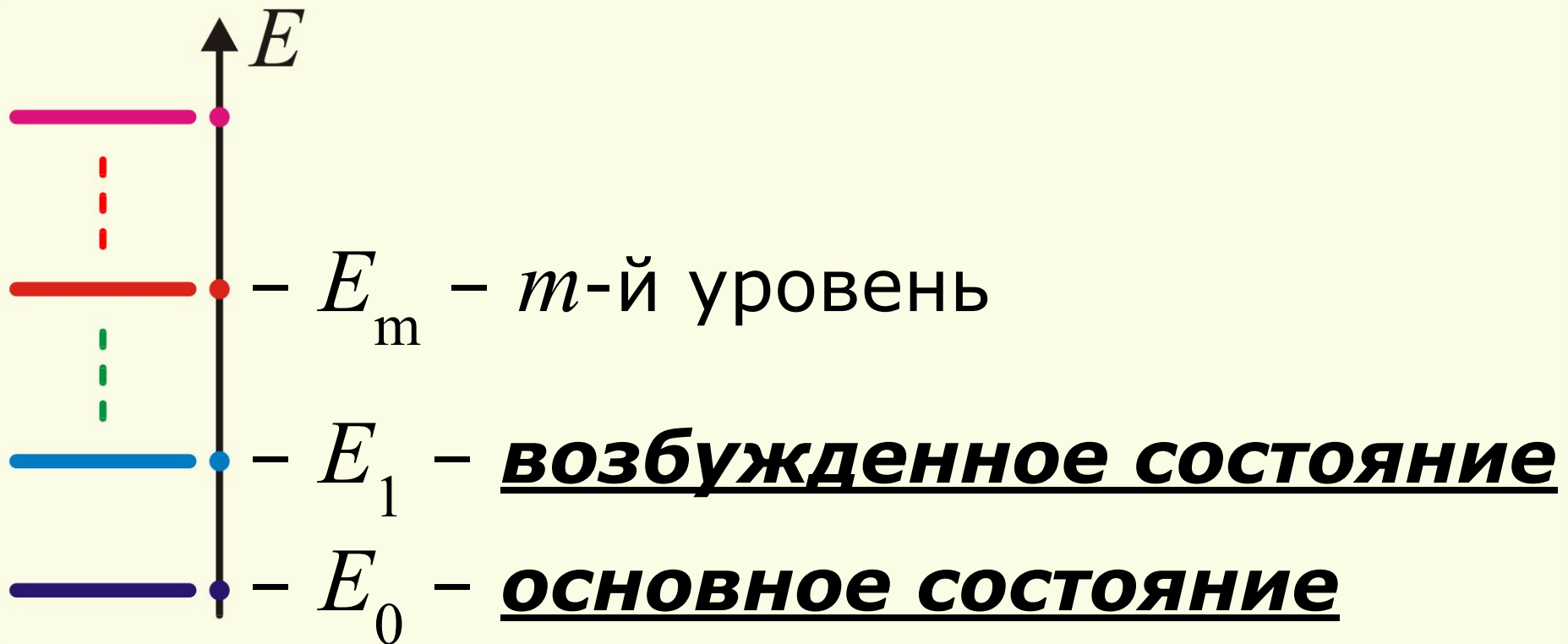
где  $\langle \varepsilon \rangle$  – средняя энергия на одну степень свободы системы

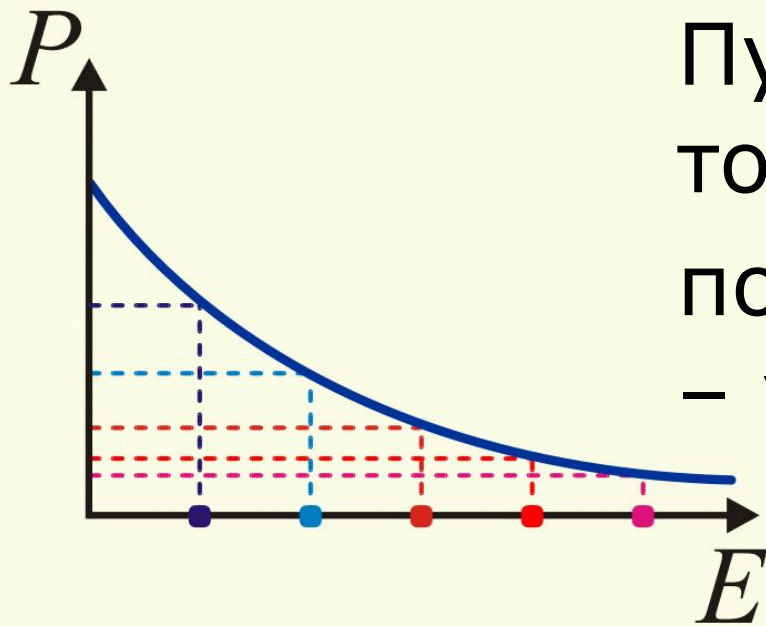
(в данном случае – на одно колебание)

(закон Больцмана дает  $\langle \varepsilon \rangle = k_B T$  и мы приходим к формуле Рэля–Джинса)

# Макс Планк (1900)

Будем рассматривать вещество стенок полости как набор осцилляторов, которые могут занимать лишь **дискретный ряд уровней.**





Пусть  $P(E)$  – вероятность того, что система займет положение с энергией  $E$  – убывающая функция

Обычно 
$$P(E) = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

Где постоянную определяют из условия

$$\sum_{m=0}^{\infty} P(E_m) = 1$$

получаем

$$\text{const} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{E_m}{k_B T}\right) = 1$$

или

$$\text{const} = \frac{1}{\sum_{m=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{E_m}{k_B T}\right)}$$

Средняя энергия:  $\langle \varepsilon \rangle = \sum E_m P(E_m)$

Пусть уровни – «равноотстоящие», т.е.

$$E_m = mE_0$$

тогда

$$\langle \varepsilon \rangle = E_0 \frac{\sum m \exp(m\alpha)}{\sum \exp(m\alpha)}, \quad \alpha = -\frac{E_0}{k_B T}$$

Вычислим сумму

$$\begin{aligned} S(\alpha) &= \sum_{m=0}^{\infty} \exp(m\alpha) = 1 + q + q^2 + \dots \\ &= 1 + q(1 + q^2 + q^3 + \dots) = 1 + qS(\alpha) \end{aligned}$$

$$S(\alpha) = \frac{1}{1-q} = \frac{1}{1-\exp(\alpha)}$$

$$\frac{dS}{d\alpha} = \sum m \exp(m\alpha) = \frac{\exp(\alpha)}{[1-\exp(\alpha)]^2}$$

Следовательно

$$\langle \varepsilon \rangle = E_0 \frac{\exp(\alpha)}{1-\exp(\alpha)} = \frac{E_0}{\exp\left(-\frac{E_0}{k_B T}\right) - 1}$$

классический предельный случай  $E_0 \rightarrow 0$

$$\langle \varepsilon \rangle = k_B T$$

Планк предположил, что  $E_0 \neq 0$  и определяется **ТОЛЬКО** свойствами излучения

Пусть энергия поглощается/излучается **квантами** (порциями) с энергией

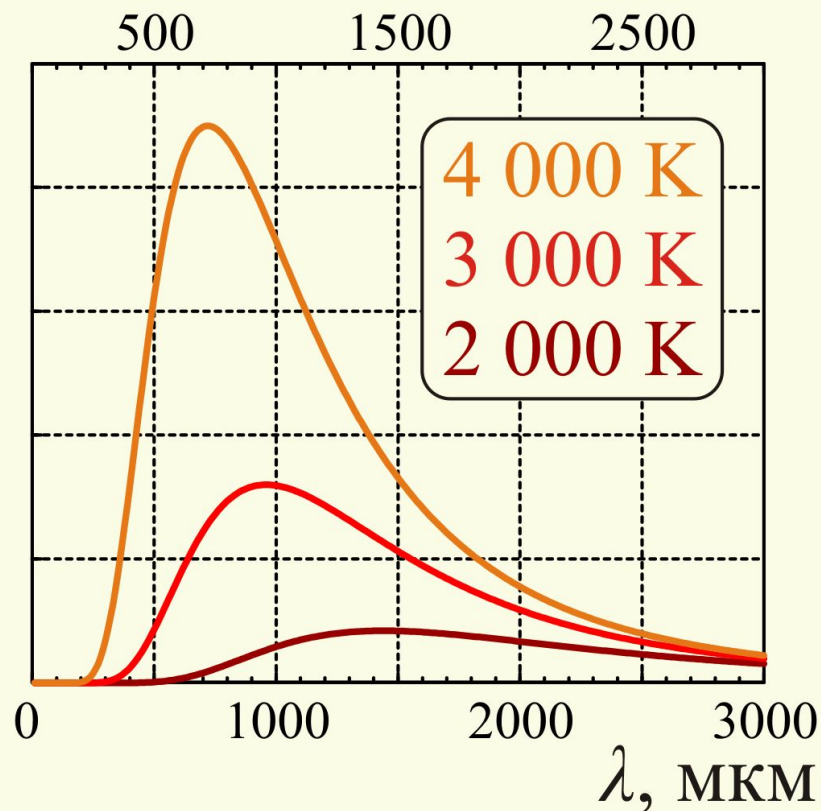
$$E_0 = h\nu = \hbar\omega$$

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж/с – постоянная Планка

$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж/с (Поль Дирак)

тогда

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1}$$



$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2 \left[ \exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1 \right]}$$

**формула Планка**



Формула Планка дает исчерпывающее описание свойств теплового излучения.

Она содержит:

1) закон Стефана–Больцмана

$$\int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

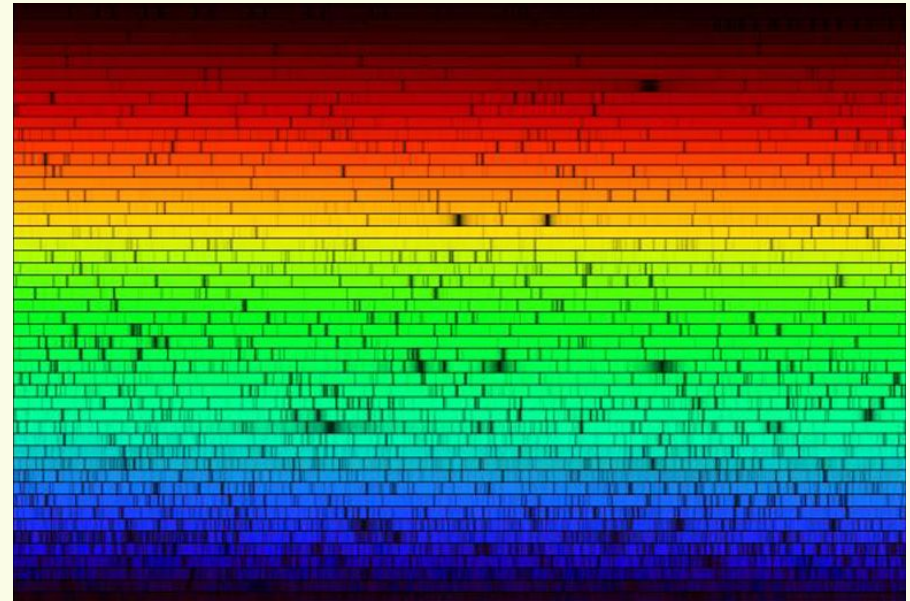
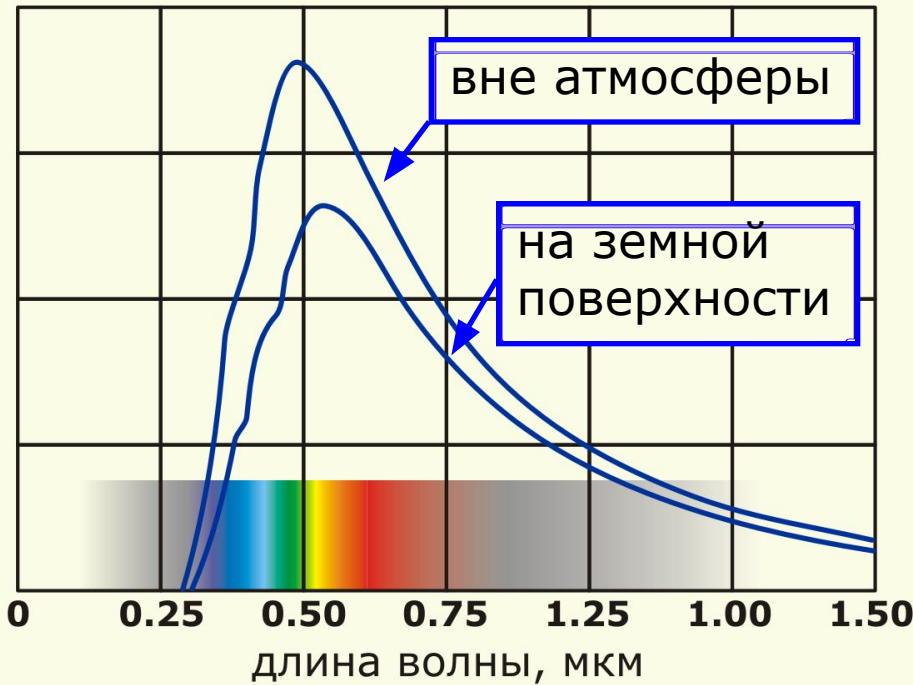
2) закон смещения Вина

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b \quad b = 2,9 \cdot 10^{-3}$$

3) описание спектра теплового излучения во всем диапазоне  $\lambda$

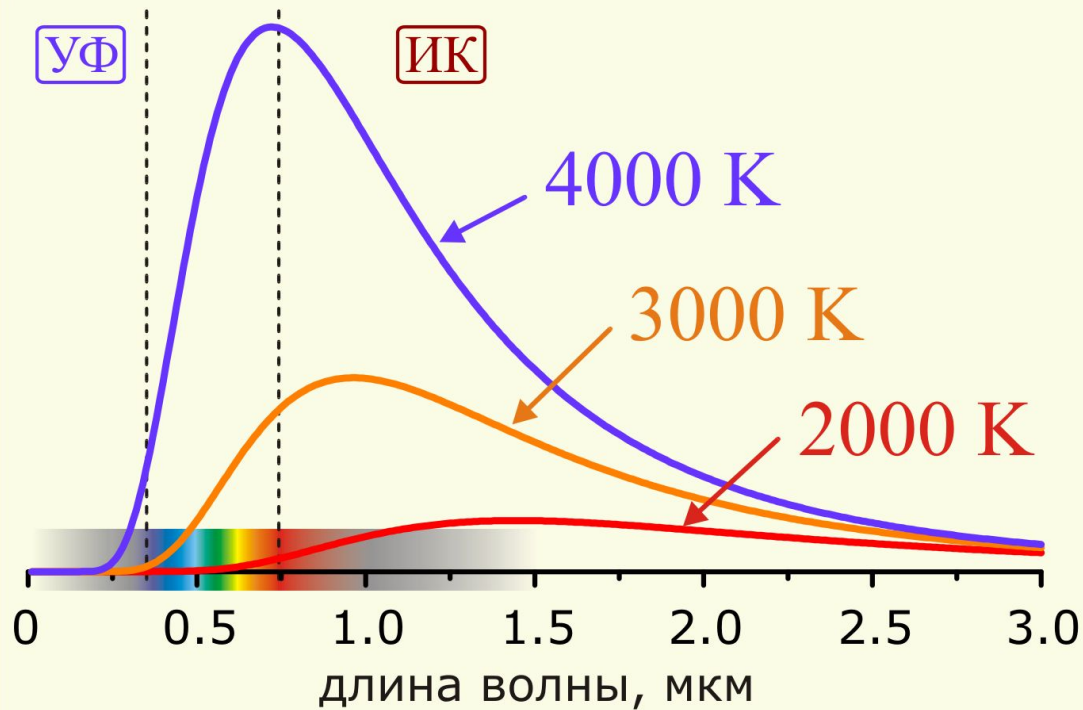
# §§ Источники света

## 1) Солнце



Спектр излучения Солнца близок к спектру АЧТ с  $T \approx 6000 \text{ К}$  ( $\lambda_m \approx 0.47 \mu$ )

## 2) Тепловые источники света



$$R = \sigma T^4$$

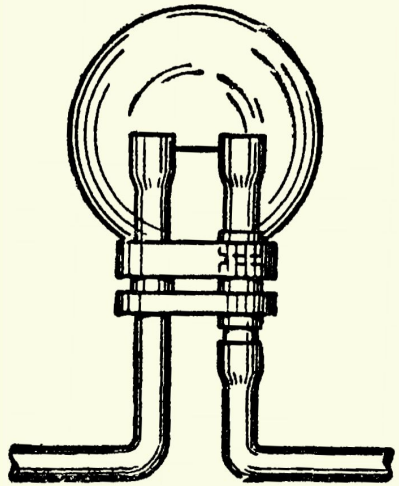
$$\lambda_{\max} \cdot T = b$$

$$RT_{\text{вид}} = 10$$

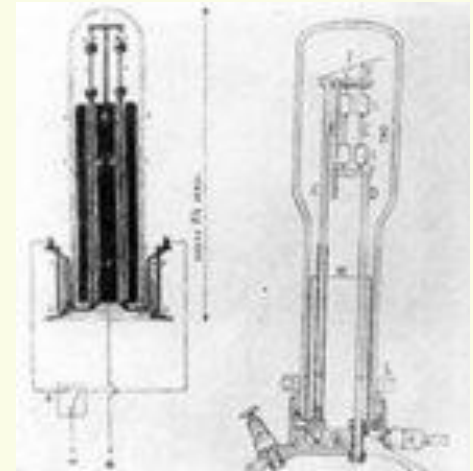
Максимум спектральной плотности приходится на край видимой области при  $T = 3850 \text{ K}$  ( $\lambda_{\max} = 750 \text{ нм}$ )



Дейви (Davy, 1778-1829)  
в начале 19 в. изобрел  
дуговую лампу



Лодыгин, 1872  
 $T \sim 2200 \text{ K}$   
 $\eta \sim 0.5 \%$   
 $t \sim 500\text{--}1000 \text{ ч.}$



Гейсер в 1856 г. изобрел  
**флуоресцентную** лампу





## 1973 г., люминисцентные лампы

Пары ртути в инертном газе (аргон, неон) испускают ультрафиолет, который вызывает свечение люминофора

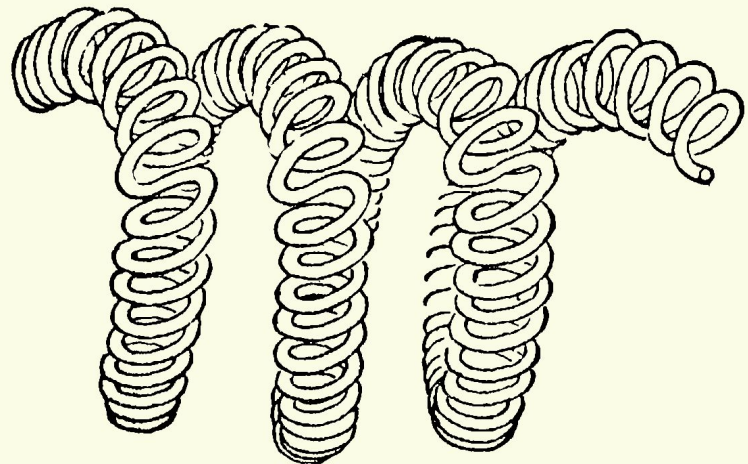


Такие лампы потребляют в 5 раз меньше энергии. Срок службы достигает 15000 ч.

# Лампа накаливания

внутри  $N_2$  (азот)  
при  $T_K: P \sim 0.5$  атм.

Двойная спираль  
вольфрамовой  
нити ( $T \sim 3000$  К)



Излучение вольфрама не соответствует излучению АЧТ, что приводит к большей светоотдаче.

срок службы: 500-1500 ч.

КПД не превышает 5%

(у лучших источников не более 20%)



**Галогеновые лампы** имеют кварцевую колбу, а внутри – инертный газ с добавками галогенов, чтобы испаряющийся вольфрам вновь осаждался на спирали



«Ксеноновые» лампы – газоразрядные источники света

мощность: 75 Вт - 50 кВт

англ.: HID

(High Intensity Discharge)



источником света является электрическая дуга в газоразрядной камере с инертными газами

Для их розжига нужен мощный разряд — порядка 25 киловольт.



# §§ Применение законов ТИ

- 1) ИК-сушка,  
нагрев
- 2) освещение  
(при  $T \sim 6700 \text{ K}$   
 $\eta_{\text{max}} \sim 14\%$   
с учетом  
спектральной  
чувствительности  
глаз)

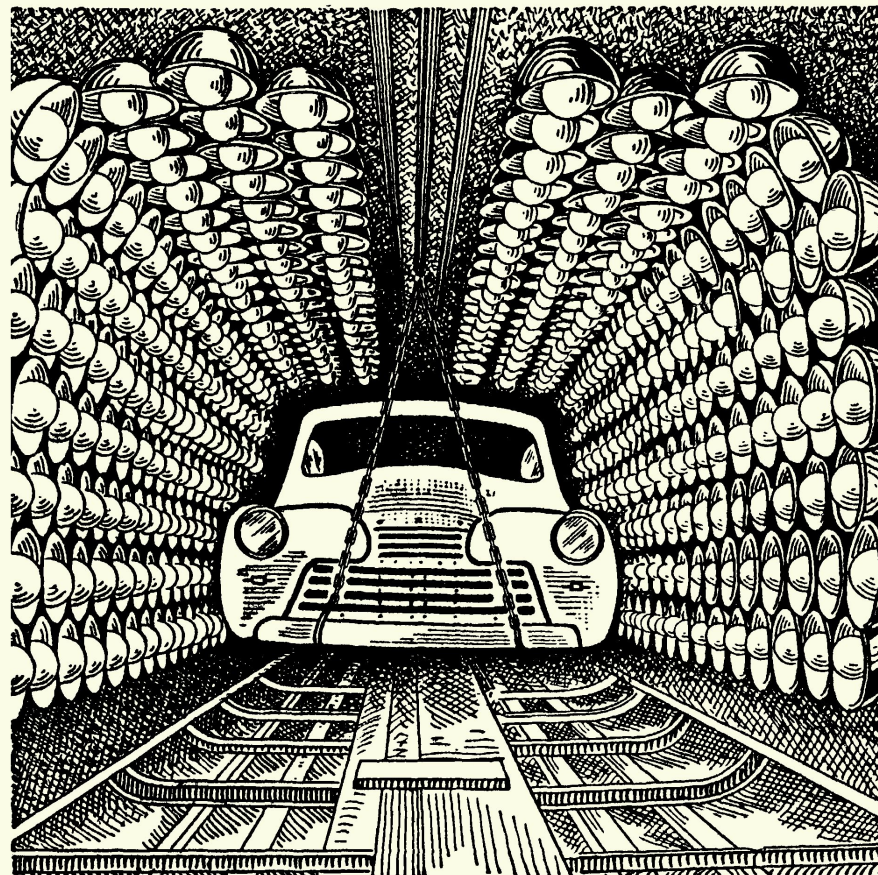


Рис. 209. Туннель для сушки автомобилей инфракрасными лучами.

Путилов К.А. Курс физики, т.3, с.229

### 3) оптическая пирометрия

а) закон Стефана–Больцмана  
(радиационная пирометрия)

б) закон смещения Вина  
(пирометр с исчезающей нитью)

в) цветные пирометры

