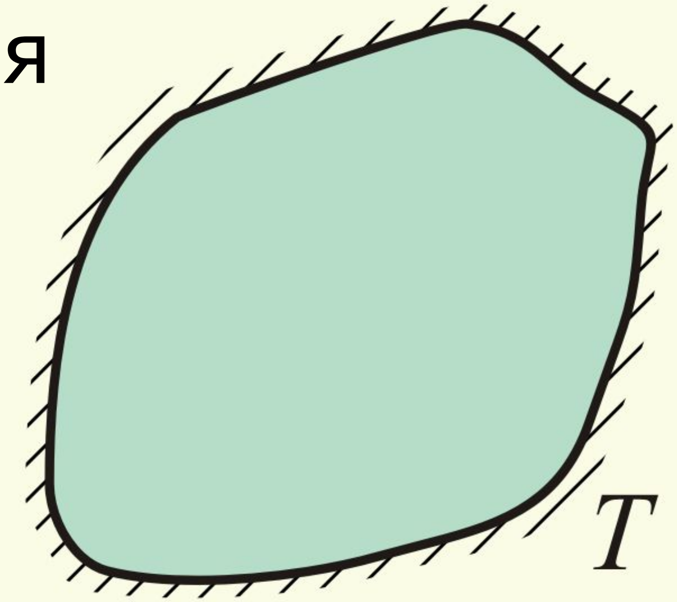
ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

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***.

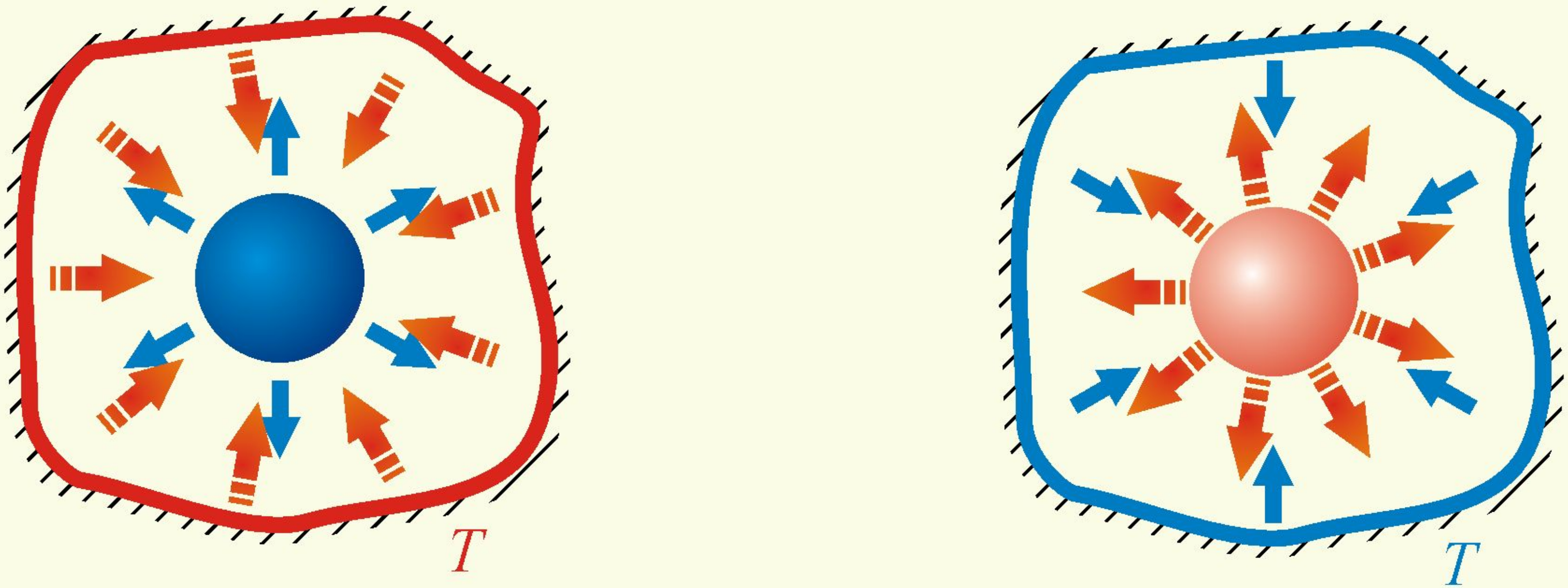
Оно однородно, изотропно и деполяризовано.

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

<u>Потоком</u> (*мощностью*) ***<u>излучения</u>***

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

$$\boxed{\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t}} \qquad [\Phi] = 1\,\frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1\,\text{Вт}$$

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

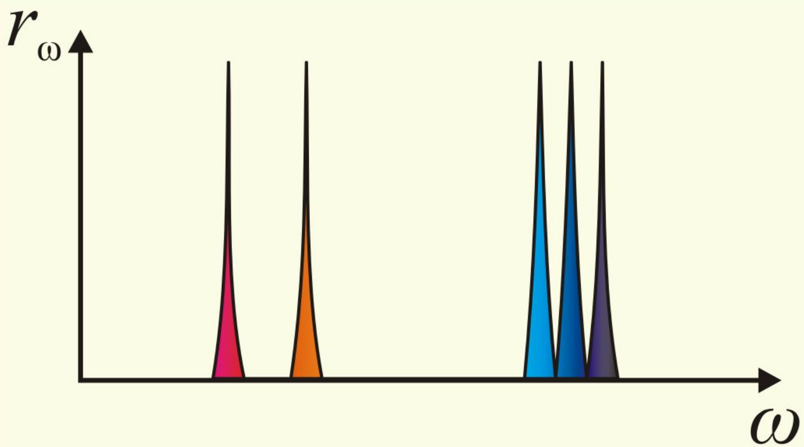
Энергетической светимостью

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

$$\boxed{R = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}} \qquad [R] = 1\ \text{Вт/м}^2$$

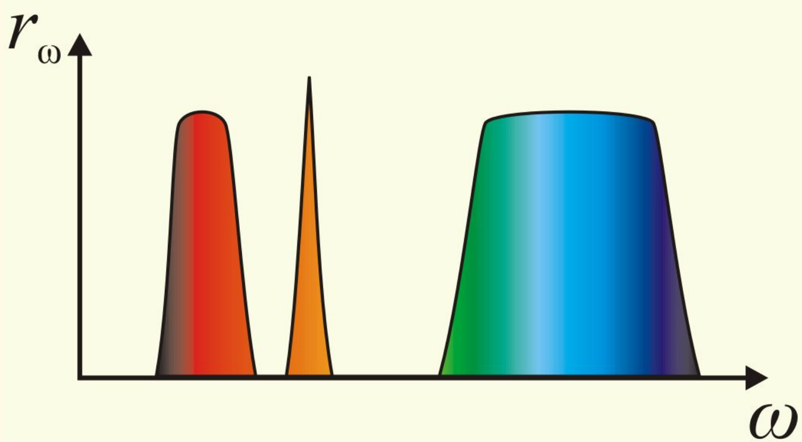
Эти величины – **интегральные**, т.е. учитывают энергию, переносимую волнами всех частот (длин волн)

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



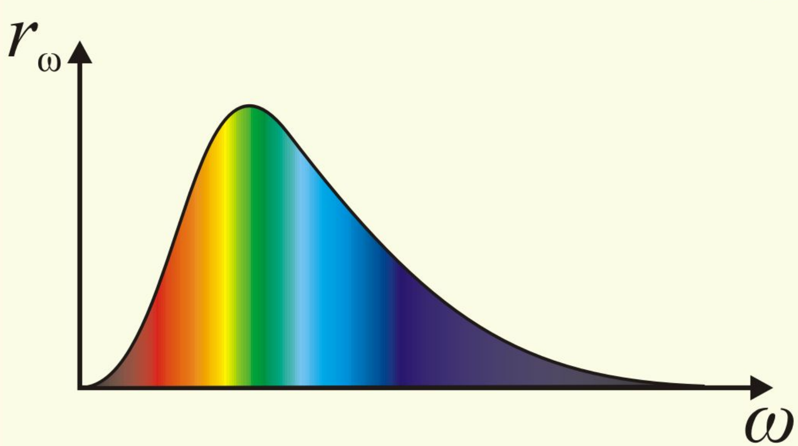
линейчатый спектр

уединенные атомы,
разряженные газы



полосатый спектр

конденсированное
вещество



сплошной спектр

равновесное
(тепловое) излучение

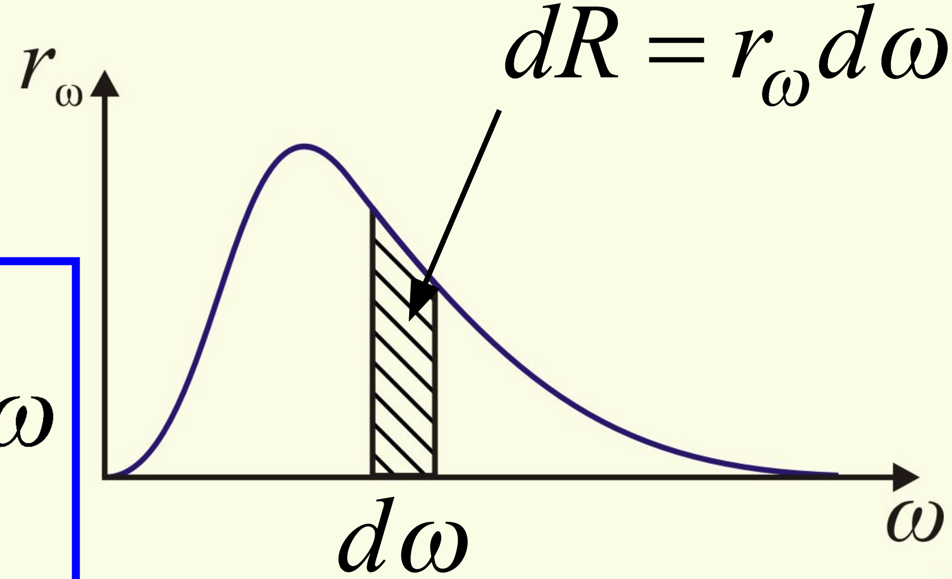
Испускательная способность –

величина, равная ***спектральной плотности*** энергетической светимости

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

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

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



§§ 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 ***<u>поглощательной способностью</u>***

Эта величина зависит

от природы тела,

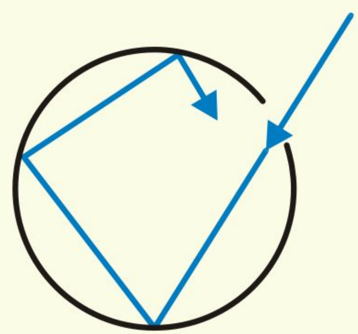
температуры,

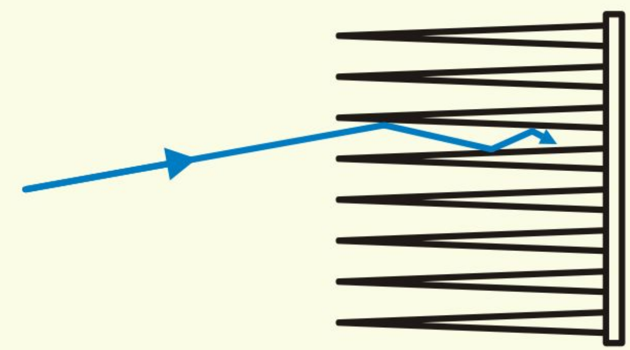
состояния поверхности,

частоты падающего излучения.

Для ***<u>абсолютно черного тела</u>*** ***(АЧТ)***

$$\boxed{A(\omega,T)=1}$$



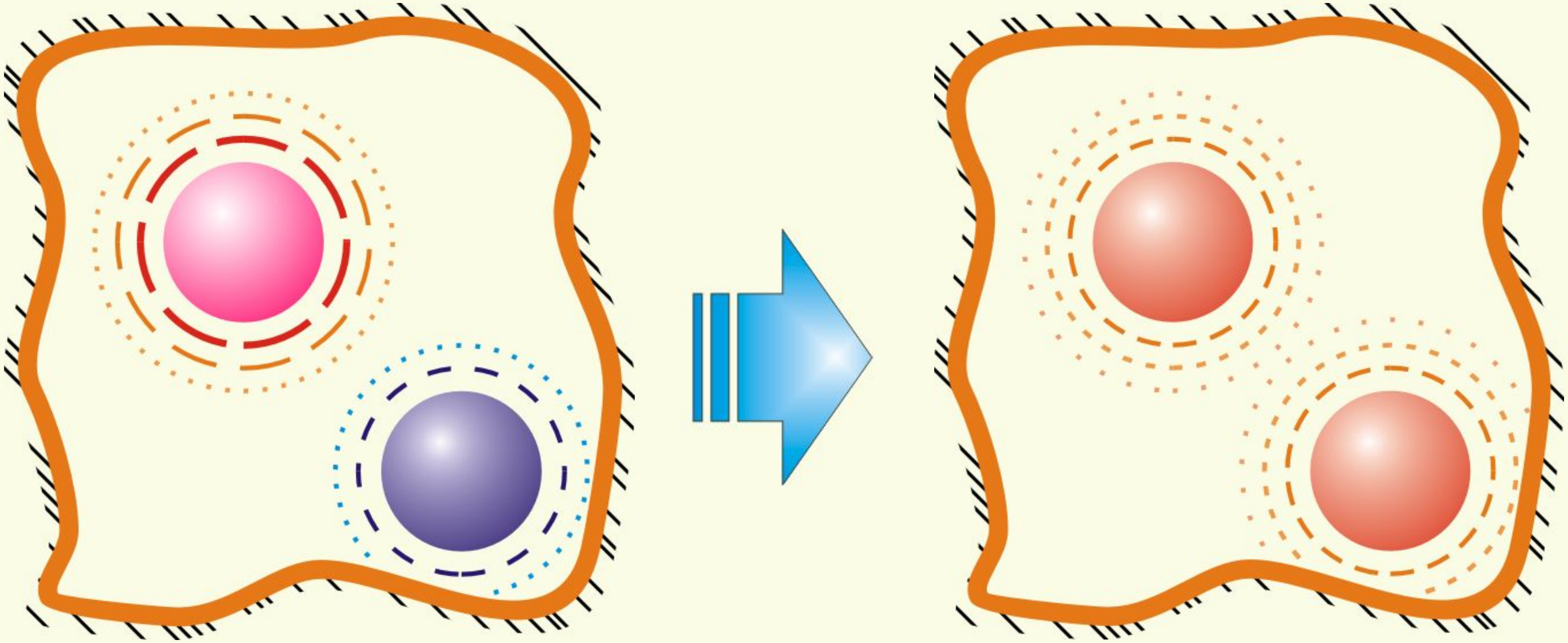


Тело называют ***<u>серым</u>***, если

$$\boxed{A(\omega,T)=A(T)<1}$$

§§ 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.

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

Кирхгоф, 1859

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

§§ Закон Стефана-Больцмана

Стефан, 1879, опытные данные

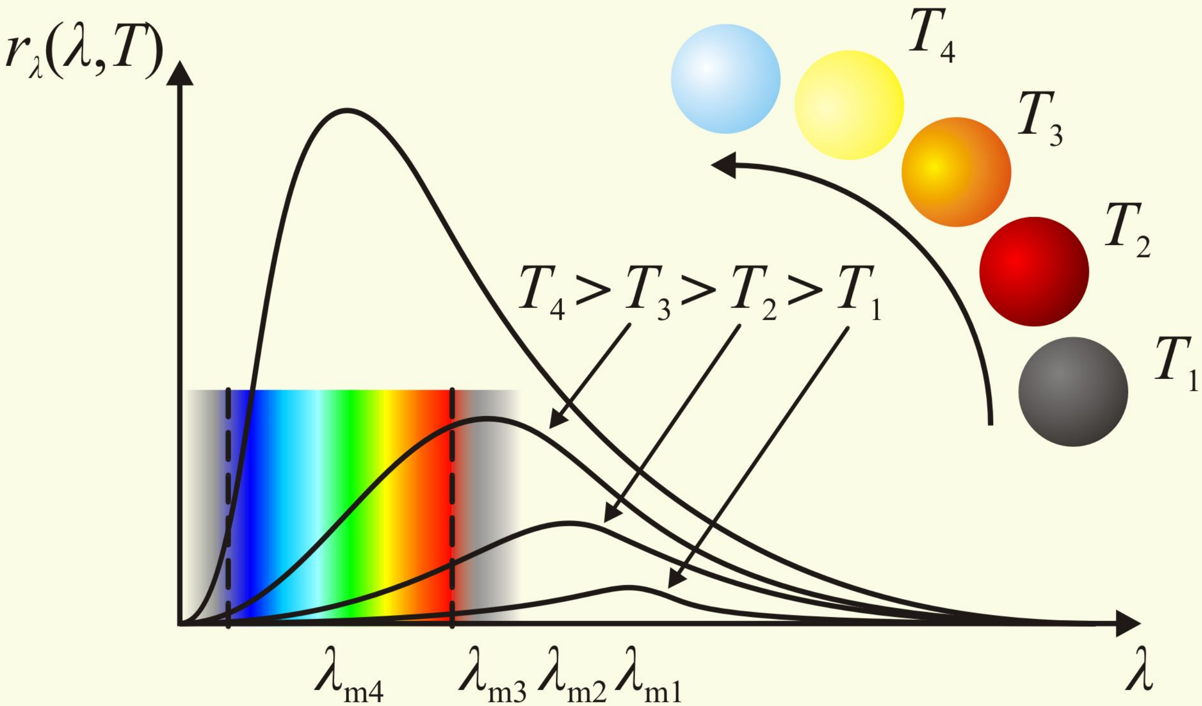
$$R = \mathrm{const}\cdot T^4$$ – для любого тела

Больцман, 1884, теоретический расчет

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

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

§§ Закон смещения Вина



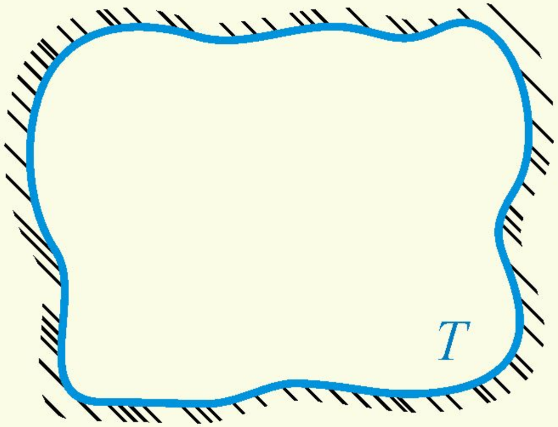
длина волны λ_m, соответствующая максимуму, определяется соотношением

$$\boxed{\lambda_m T = b}$$

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

§§ Формула Рэлея–Джинса

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



Пусть $T = \mathrm{const}$

Полная энергия теплового (равновесного) излучения:

$$W = W(T)$$

объемная плотность энергии ЭМВ

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

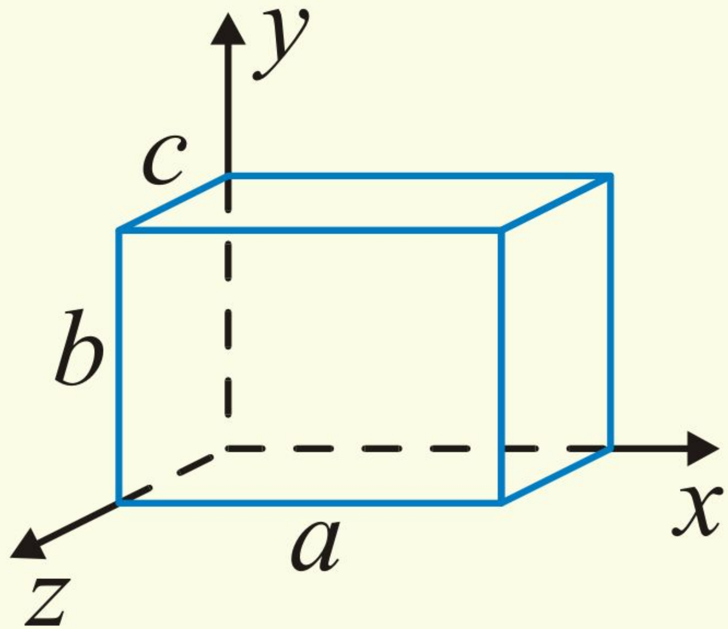
Энергия ЭМВ распределена по частотам неравномерно

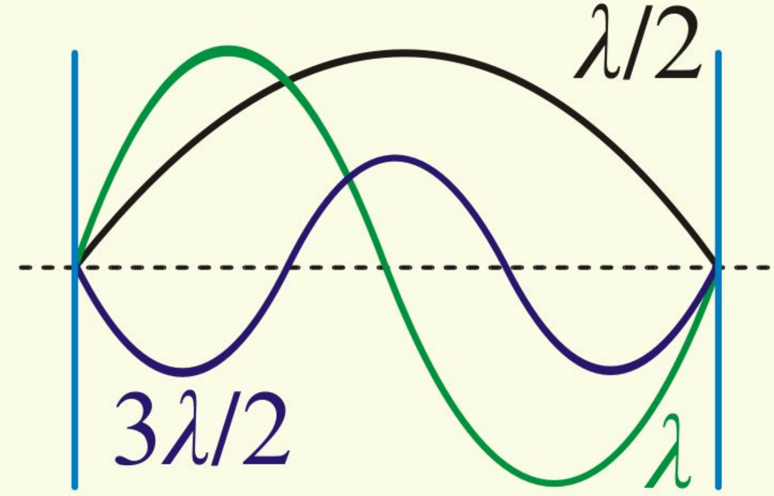
$$U(T)=\int_0^{\infty} u(\omega,T)d\omega$$

$u(\omega,T)d\omega$ – 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.





$$a = m_x \frac{\lambda}{2} = m_x \frac{\pi}{k_x} \qquad m_x = 1, 2, 3 \ldots$$

$k_x = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число

для осей y и z аналогично

$\vec{k} = \{k_x, k_y, k_z\}$ – волновой вектор

для встречных волн: $\vec{k}, -\vec{k}$

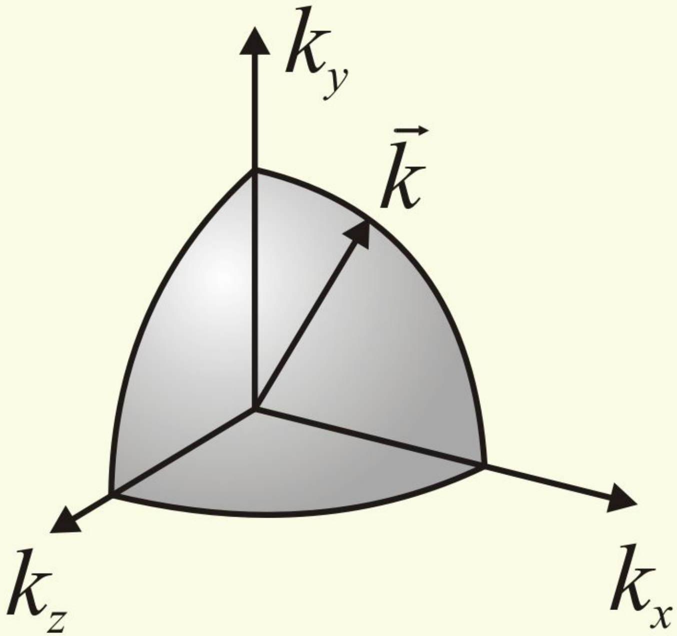
Модуль волнового вектора:

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

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

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

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

Число состояний

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

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

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

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 $[\omega, \omega + d\omega]$

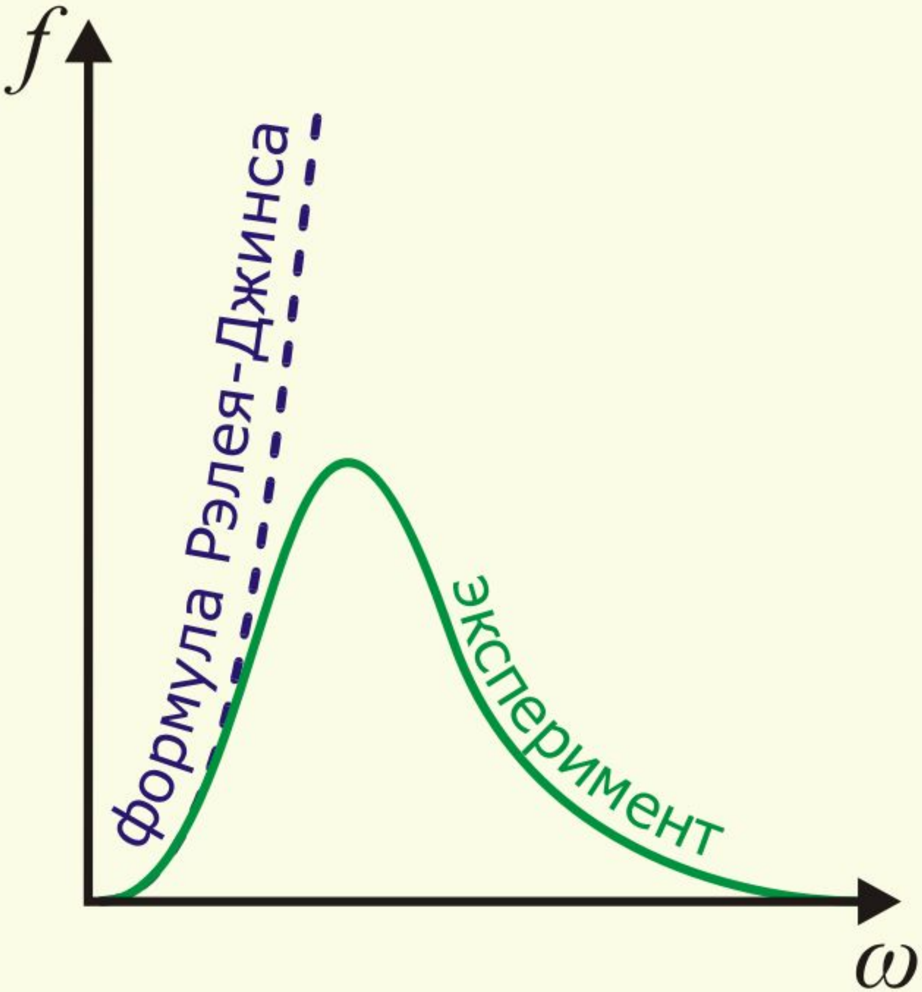
$$u(\omega,T)d\omega = \langle\varepsilon\rangle \frac{dN}{V},$$

$\langle\varepsilon\rangle$ – 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 $k_B T$.

<u>***формула Рэлея–Джинса***</u>

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



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

Однако,

$$\int_0^{\infty} f(\omega,T)\,d\omega \to \infty$$, а не к σT^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

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

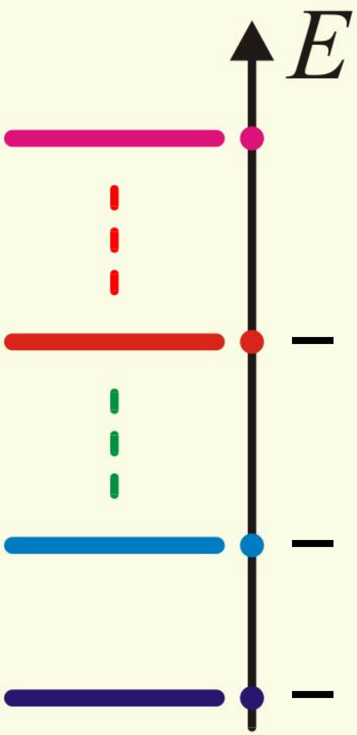
где $\langle\varepsilon\rangle$ – средняя энергия на одну степень свободы системы

(в данном случае – на одно колебание)

(закон Больцмана дает $\langle\varepsilon\rangle=k_BT$ и мы приходим к формуле Рэлея–Джинса)

Макс Планк (1900)

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

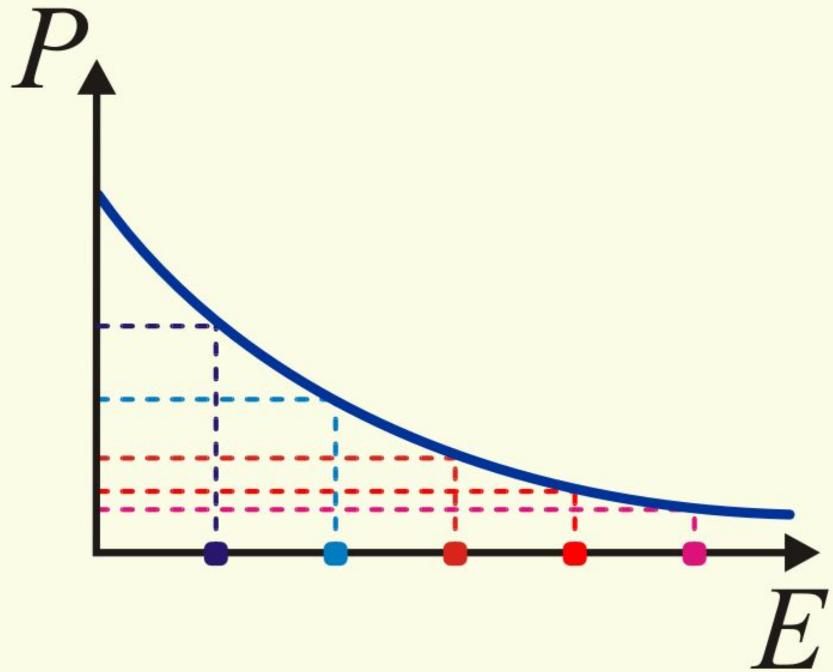


– E_m – m-й уровень

– E_1 – ***<u>возбужденное состояние</u>***

– E_0 – ***<u>основное состояние</u>***

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



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

Постоянную определяют из условия

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

получаем

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

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

$$S(\alpha) = \sum_{m=0}^{\infty} \exp(m\alpha) = 1 + q + q^2 + \ldots$$

$$= 1 + q(1 + q^2 + q^3 + \ldots) = 1 + qS(\alpha)$$

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

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

Следовательно

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

классический предельный случай $E_0 \to 0$

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

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

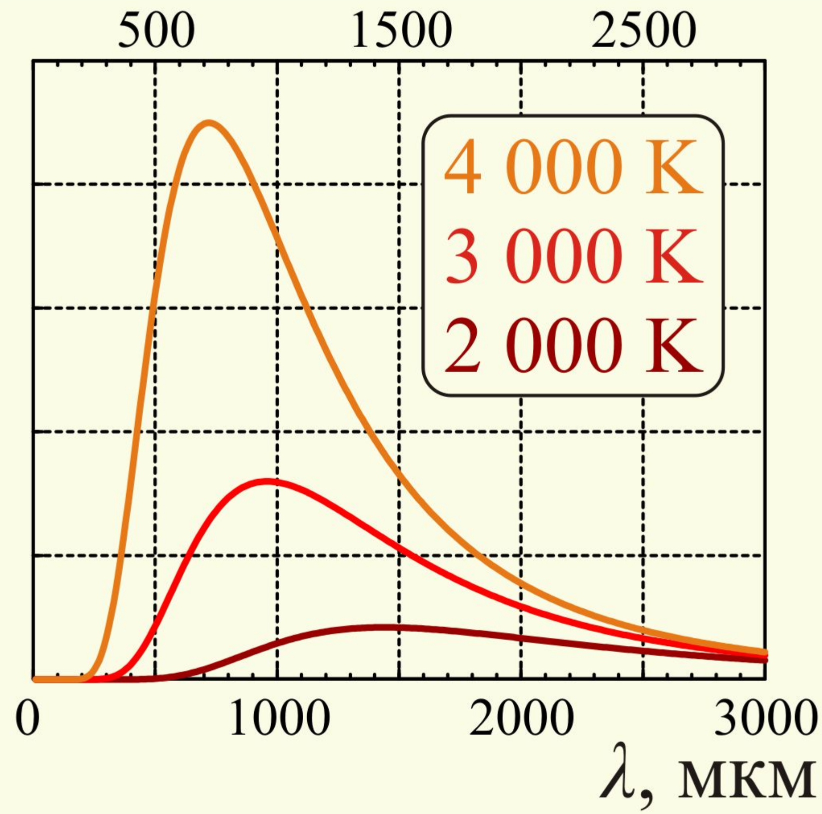
Пусть энергия поглощается/излучается ***квантами*** (порциями) с энергией

$$\boxed{E_0 = h\nu = \hbar\omega}$$

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

$\hbar = h/2\pi = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (Поль Д**и**рак) тогда

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



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

формула Планка

Формула Планка дает _исчерпывающее_ описание свойств теплового излучения:

1) закон Стефана–Больцмана

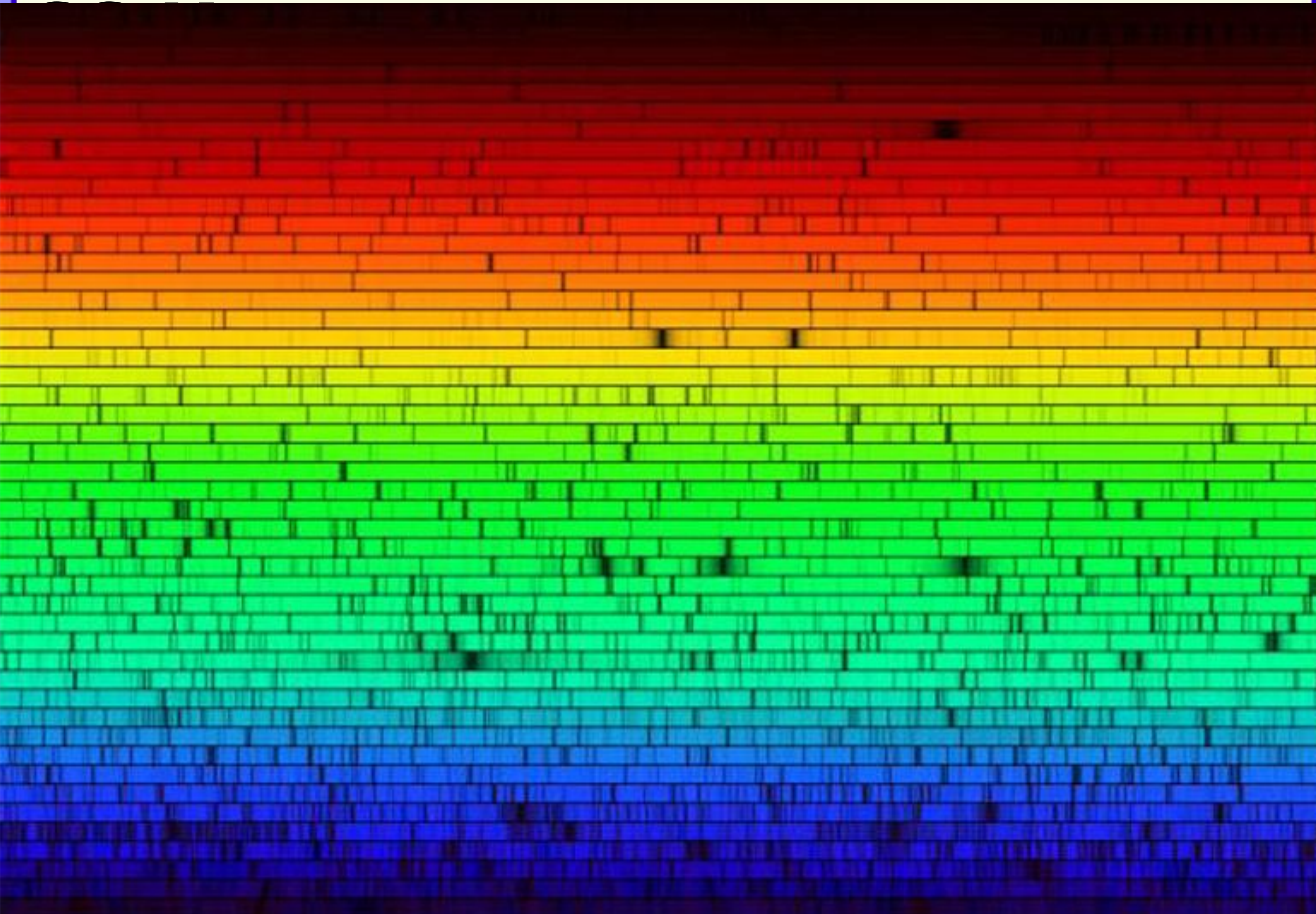
$$\int_0^{\infty} f(\omega, T)\,d\omega = \sigma T^4$$

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

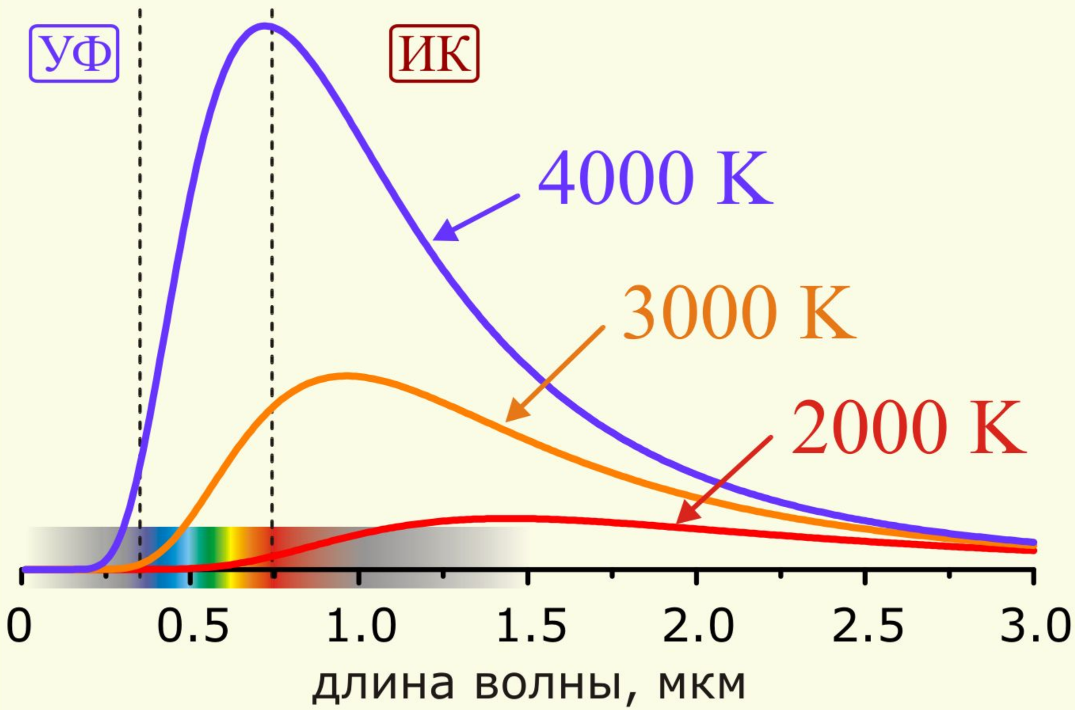
2) закон смещения Вина

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

3) описание спектра теплового излучения во всем диапазоне λ



2) Тепловые источники света



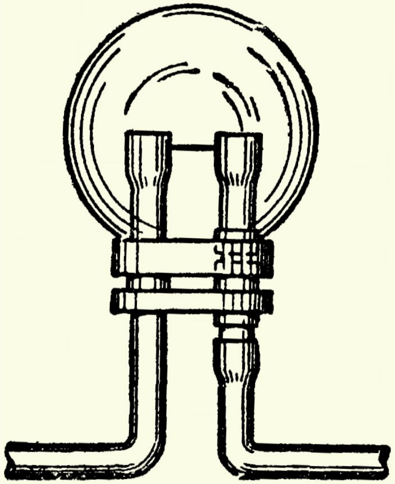
$$R = \sigma T^4$$

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

$$R_{вид} = \quad 10$$

Максимум спектральной плотности приходится на край видимой области при $T = 3\,850$ K $(\lambda_{max} = 750$ нм$)$

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

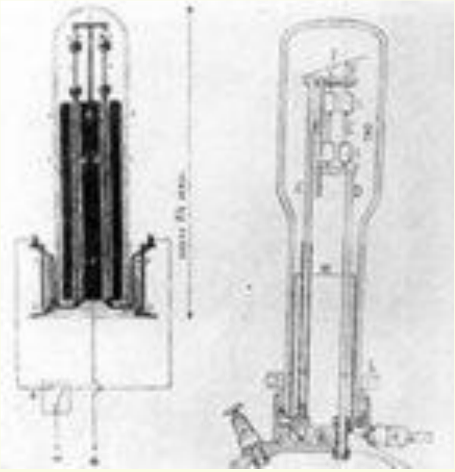


Лодыгин, 1872

$$T \sim 2200\ \text{K}$$

$$\eta \sim 0.5\ \%$$

$$t \sim 500\text{–}1000\ \text{ч.}$$



Гейссер в 1856 г. изобрел ***<u>флуоресцентную</u>*** лампу

1973 г., ***люминисцентные*** лампы

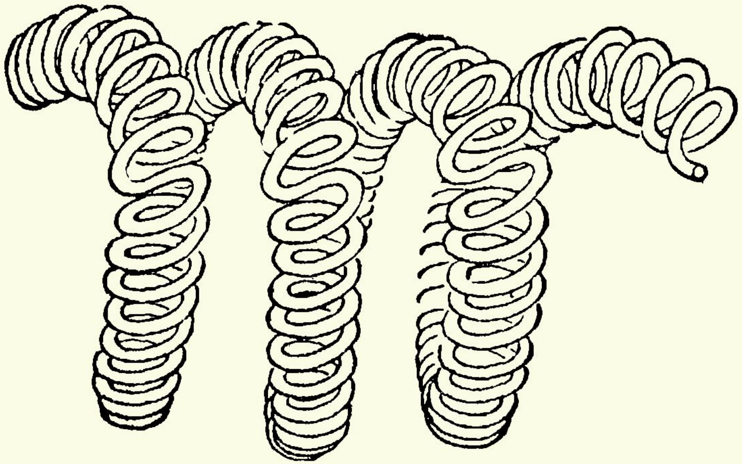
Пары ртути в инертном газе (аргон, неон) испускают ультрафиолет, который вызывает свечение люминофора

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

Лампа накаливания

внутри N_2 (азот)
при $T_к$: P~0.5 атм.

Двойная спираль вольфрамовой нити ($T \sim 3\,000$ К)



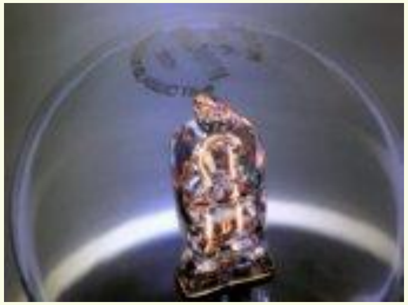
Излучение вольфрама не соответствует излучению АЧТ, что приводит к большей светоотдаче.

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 $T \sim 6700$ K $\eta_{\max} \sim 14$ % с учетом спектральной чувствительности глаз)

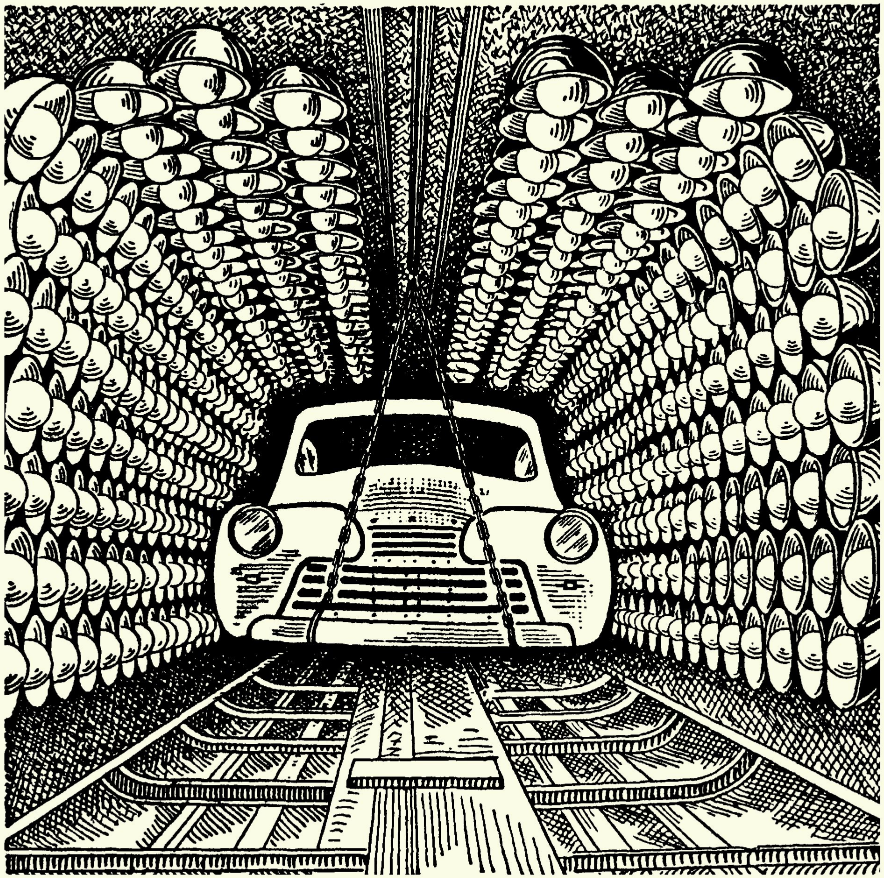


Рис. 209. Туннель для сушки автомобилей инфракрасными лучами.

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) цветовые пирометры