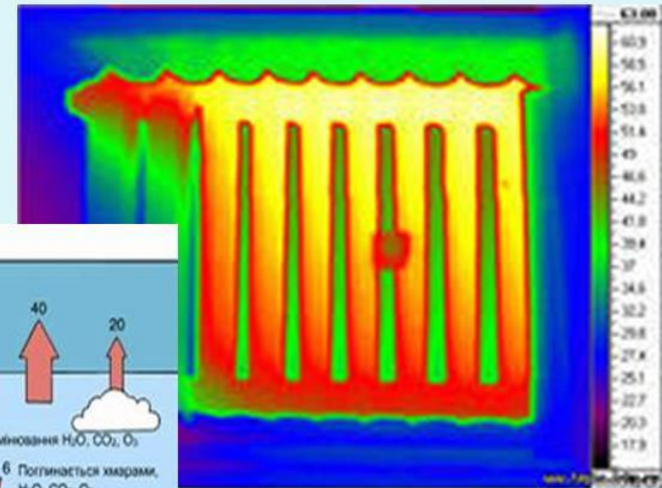
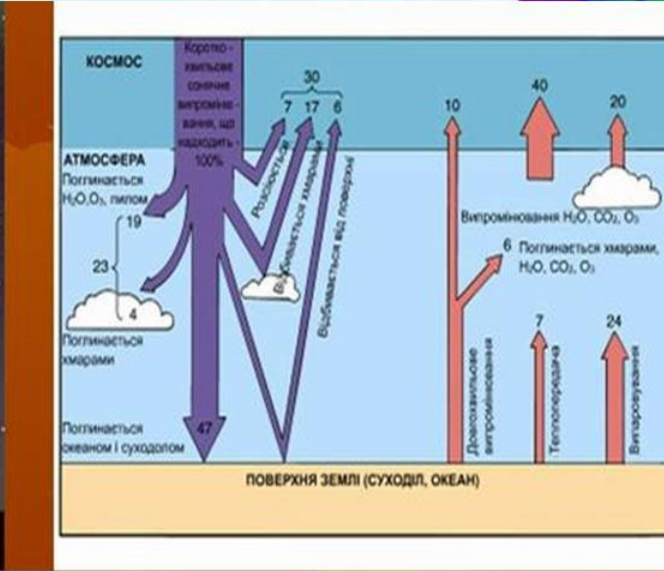


# Тема 3 (2 час, лекція 1)

## Лекція 13



Теплообмен излучением. Основные понятия и законы. Природа теплового излучения. Лучистый поток. Плотность лучистого потока. Интенсивность излучения. Поглощательная, отражательная и пропускательная способность тел. Законы излучения абсолютно черного тела: Стефана – Больцмана, Планка, Вина. Серое тело. Степень черноты. Закон Кирхгофа для монохроматического и интегрального излучения. Закон Ламберта.

Теплопроводность и конвекция определяются вектором, связанным с локальным градиентом температуры.

При тепловом излучении - лучистый поток через объем не зависит от температуры объема (а, следовательно, от разности температуры среды и излучающего тела), а только от излучения внешних источников. Поэтому вектор теплового излучения определяется интегрально.

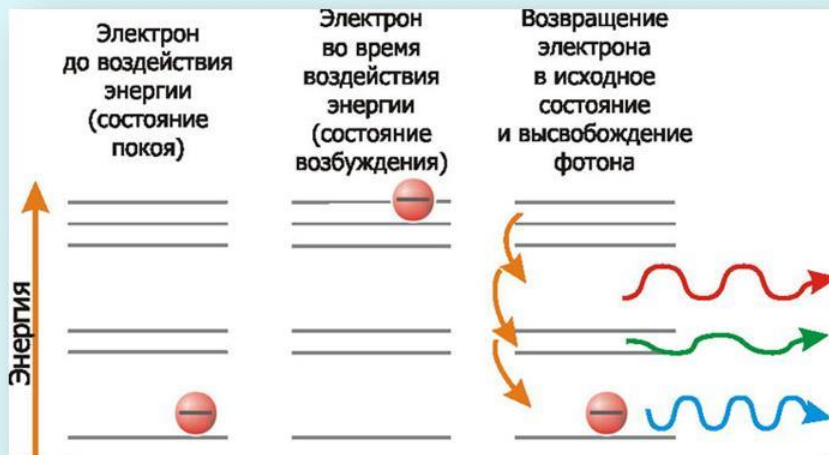
Тепловое излучение – процесс распространения электромагнитных волн, который характеризуется спектром частот и соответствует энергетическому уровню структурных частиц вещества.

Основными характеристиками электромагнитных волн являются: длина волны ( $\lambda$ ) и частота колебаний в секунду ( $\nu$ ).

$$c = \lambda \cdot \nu, \quad \text{где } c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с, скорость света в вакууме.}$$

Энергия одного кванта излучения (принцип квантовой энергии):  $\epsilon_k = h \cdot \nu$

$h = 6.62517 \cdot 10^{-34}$  Дж/с – постоянная Планка (так называемое элементарное действие).

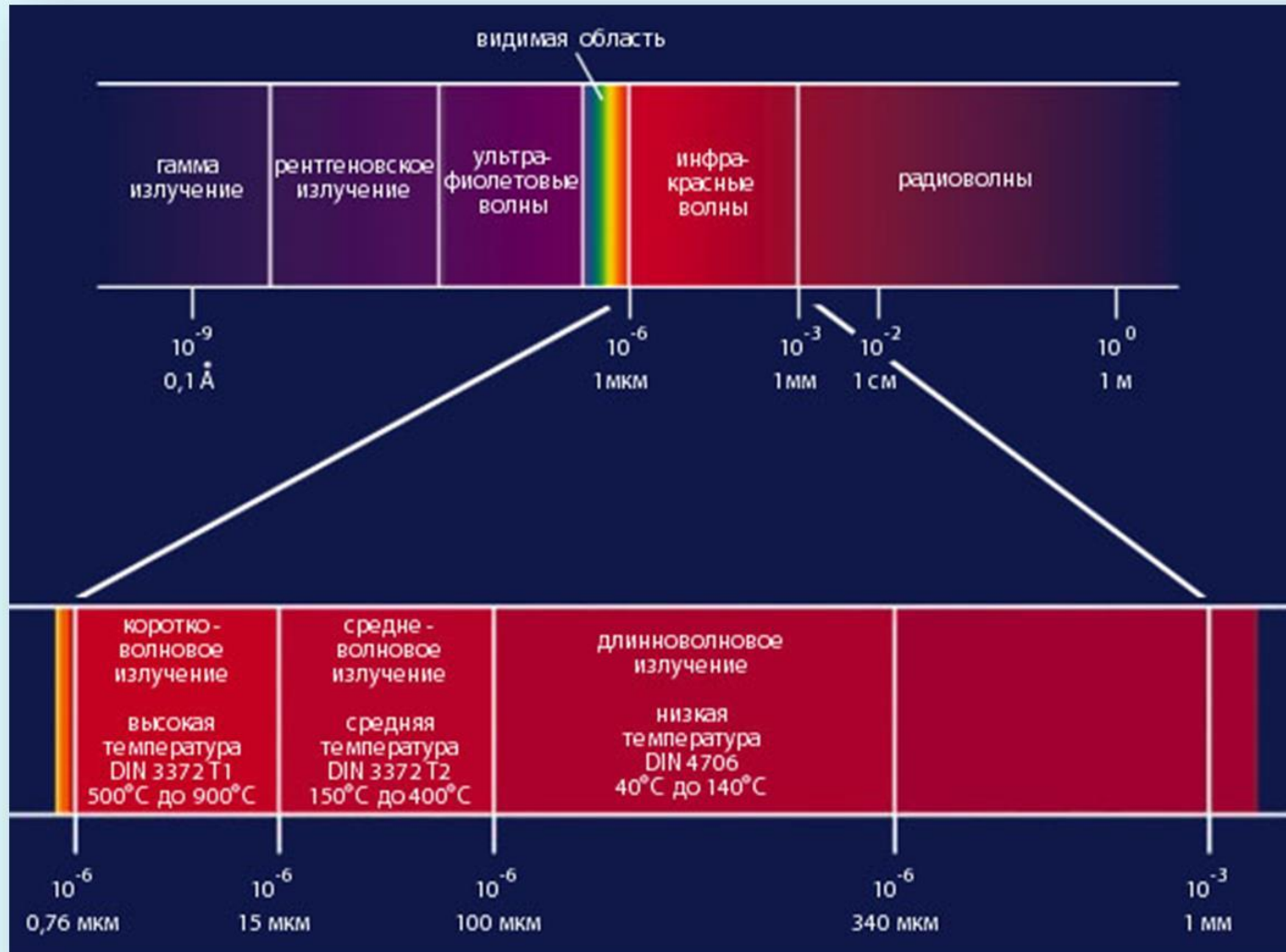


При  $T > 0^\circ\text{K}$  между расположенными как угодно в пространстве телами имеет место непрерывный теплообмен излучением.

При температурном равновесии тел количество отдаваемой энергии излучения равно количеству поглощаемой энергии излучения.

В настоящее время принято считать, что тепловое излучение занимает широкую область длин волн:  
 $\lambda = 0,72 \div 1000 \text{ мк}$

Для передачи теплоты наибольший интерес представляют лучи с длиной волны  
 $\lambda = 0,8 \div 40 \text{ мк}$ .

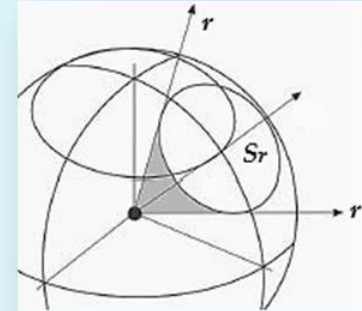


- ❖ Большинство твердых и жидких тел - непрерывный спектр излучения (испускают лучи всех длин волн).
- ❖ Газы испускают лучи не всех длин волн - избирательное или селективное излучение. Спектр - линейчатый.
- ❖ Доказано, что в излучении твердого тела участвуют не только поверхностные его частицы, а тонкий слой определенной толщины, хотя и весьма тонкий.

**Суммарное излучение** с поверхности твердого тела по всем направлениям полусферического пространства (в пределах телесного угла  $\omega = 2\pi$ ) и всех длин волн спектра называется **интегральным излучением  $Q$** .

**Телесный угол**, часть пространства, ограниченная некоторой конической поверхностью.

Частными случаями Т.у. являются трёхгранные и многогранные углы.



Т.у. измеряется отношением площади  $S$  той части сферы с центром в вершине конической поверхности, которая вырезается этим Т. у., к квадрату радиуса  $R$  сферы.

Единицей измерения Т. у. является стерадиан, равный Т. у., вырезающему из сферы единичного радиуса поверхность с площадью в 1 квадратную единицу.

Полная сфера образует Т. у., равный  $4\pi$  стерадиан.

Излучение с плоскости в пределах телесного угла  $\omega = 2\pi$  – характеризуется плотностью полусферического или поверхностного интегрального излучения:

$$E = \frac{dQ}{dF}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$dQ$  – элементарный поток излучения, Вт;

$dF$  – элемент поверхности излучения,  $\text{м}^2$ .

Объемное тепловое излучение (газы или точечный источник излучения), - плотностью объемного интегрального излучения – лучистом потоке, испускаемом единицей объема среды в пределах телесного угла  $\omega = 4\pi$ :

$$E_v = \frac{dQ}{dV}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

Каждое тело - излучать, поглощать, отражать и пропускать через себя :

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D$$

$Q$  –падающий на тело поток, Вт;

$Q_A$  – поток, поглощенный телом, Вт;

$Q_R$  – поток, отраженный телом, Вт;

$Q_D$  – поток, прошедший сквозь тело, Вт;

$$A + R + D = 1$$

$A$  – поглощательная способность тела (коэффициент поглощения);

$R$  – отражательная способность тела (коэффициент отражения);

$D$  – пропускательная способность тела (коэффициент пропускания).

$A = 1$  ( $R = 0$  и  $D = 0$ ) - *поверхность абсолютно черная.*

$R = 1$  ( $A = 0$  и  $D = 0$ ) - *поверхность абсолютно белая.*

$D = 1$  ( $A = 0$  и  $R = 0$ ) - *абсолютно прозрачное для тепловых лучей.*

Свойства тел поглощать или отражать тепловые лучи - от состояния поверхности, а не от ее цвета.

Если поверхность правильно отражает лучи (отражение следует законам геометрической оптики), то поверхность - зеркальная.

Если падающий луч при отражении расщепляется на множество лучей, идущих по различным направлениям, то отражение - диффузным (поверхность мела).

*Существует распределение энергии по длинам волн и частотам, соответствующее максимально возможному тепловому излучению тела при заданной температуре.*

Тело с таким максимальным спектром излучения наз. АЧТ ( $A = 1$ ).

Распределение энергии излучения АЧТ соответствует условиям термодинамического равновесия и однозначно определяется лишь его температурой:

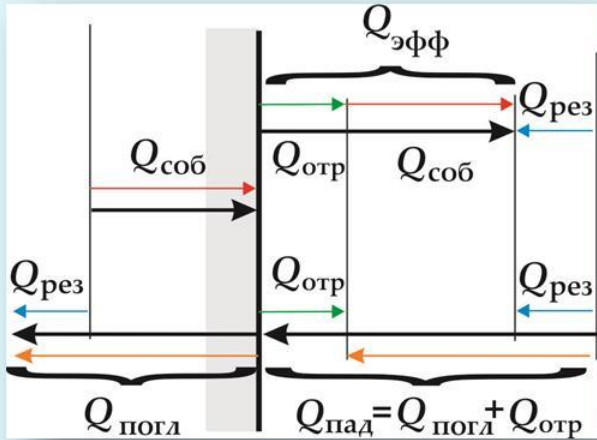
*излучение АЧТ иногда называют равновесным излучением.*

Наименование излучения	Длина волн, мк	Температура АЧТ, К
Видимый свет	0.3 – 0,72	> 4144
Близкое инфракрасное излучение	0.72 – 1.5	4144 – 1922
Среднее инфракрасное излучение	1.5 – 5.6	1922 – 533
Далекое инфракрасное излучение	5.6 ÷ 8 – 1000	533 – 273
Миллиметровые волны	1000 и выше	

Спектральной плотностью излучения называют плотность потока излучения тела для длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , отнесенную к рассматриваемому интервалу длин волн  $d\lambda$ :

$$E_\lambda = \frac{d^2Q}{dF \cdot d\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$$



Положительное направление потоков  $\rightarrow$

$$Q_{\text{эфф}} = Q_{\text{соб}} + Q_{\text{отр}}$$

$$Q_{\text{рез}} = Q_{\text{соб}} - Q_{\text{погл}} = Q_{\text{соб}} - A \cdot Q_{\text{пад}}$$

$$Q_{\text{рез}} = (Q_{\text{соб}} + Q_{\text{отр}}) - (Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}}) = Q_{\text{эфф}} - Q_{\text{пад}}$$

Все то же самое и для  $E$

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{рез}} &= E_{\text{эфф}} - E_{\text{пад}} \Rightarrow E_{\text{эфф}} = E_{\text{рез}} + E_{\text{пад}} \\ E_{\text{рез}} &= E_{\text{соб}} - A \cdot E_{\text{пад}} \Rightarrow E_{\text{пад}} = \frac{E_{\text{соб}} - E_{\text{рез}}}{A} \end{aligned} \right\}$$

$$E_{\text{эфф}} = E_{\text{рез}} \left( 1 - \frac{1}{A} \right) + \frac{E_{\text{соб}}}{A}$$

ИЛИ

$$E_{\text{эфф}} = \frac{E_{\text{соб}}}{A} - \frac{R}{A} E_{\text{рез}}$$



# Закон Стефана-Больцмана

Йозеф Стефан (нем. Joseph Stefan, 1835 – 1893) — австрийский физик и математик. Член Австрийской академии наук (1865). Известен своими работами по различным областям физики — кинетической теории газов, теории теплового излучения, оптике, акустике, электромагнетизму и др. Изучал диффузию и теплопроводность газов, получил коэффициенты теплопроводности многих из них. В 1879 году 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, известного как закон Стефана — Больцмана, было дано в 1884 году учеником Стефана Людвигом Больцманом. В математике известны задача Стефана и обратная задача Стефана с движущейся границей в теории дифференциальных уравнений с частными производными.



На основании опытных данных Стефан в 1879 г. установил, что плотность энергии излучения абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$u = a \cdot T^4$$

В 1884г. Больцман получил этот закон теоретическим путем исходя из второго закона термодинамики и допущения существования светового давления :

**(Закон Стефана-Больцмана)** - объемная плотность энергии равновесного излучения пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени.

$a$  термодинамически не определяется, а по данным опыта:

$$a = 7.64 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^4}$$

Связь между объемной плотностью равновесного излучения  $u$  и плотностью интегрального излучения  $E_0$  устанавливается соотношением:  $u = 4E_0/c$ , где  $c$  – скорость движения фотонов, равная скорости света в вакууме.

$$E_0 = \left( \frac{a \cdot c}{4} \right) \cdot T^4$$

$$\sigma = \frac{a \cdot c}{4} = 5.67 \cdot 10^{-8}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$

$$E_0 = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 = 5.67 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

$\sigma$  – постоянная излучения Стефана-Больцмана для абсолютно-черного тела.

$c_0$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Под *серым излучением* понимают такое, которое аналогично излучению черного тела, имеет сплошной спектр, но интенсивность лучей для каждой длины волны при любой температуре составляет неизменную долю от интенсивности излучения АЧТ:

$$E = \varepsilon \cdot c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

$c = \varepsilon \cdot c_0$  - коэффициент излучения серого тела.

## Закон Планка (1900 г.)

$$E_{0,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

$$c_1 = 2 \cdot \pi \cdot c_0^2 = 3.741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$$

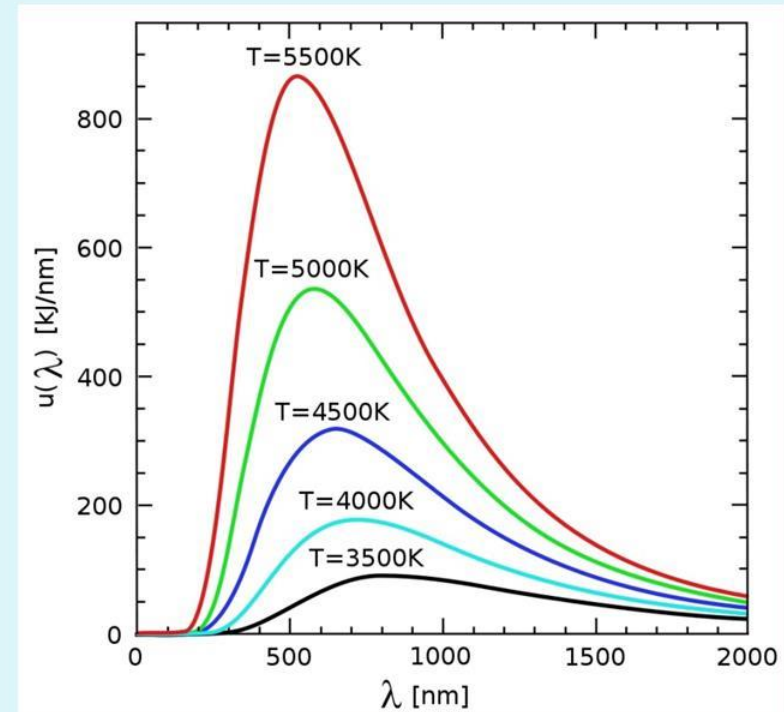
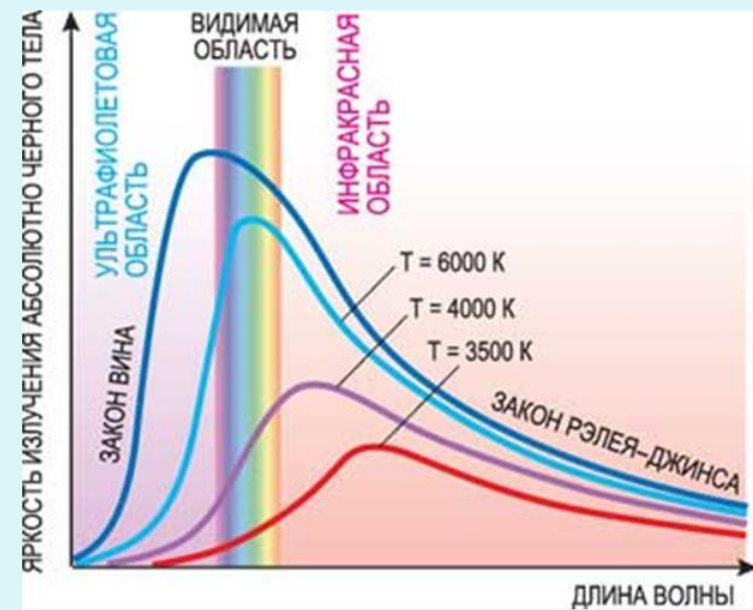
$$c_2 = h \cdot c_0 / k = 1.438786 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$$

$c_0 = 3 \cdot 10^8$ , м/с – скорость света в вакууме

$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ , Дж·с – постоянная Планка

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана

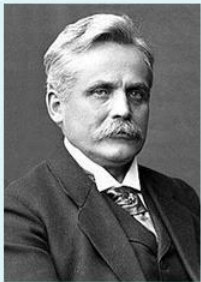
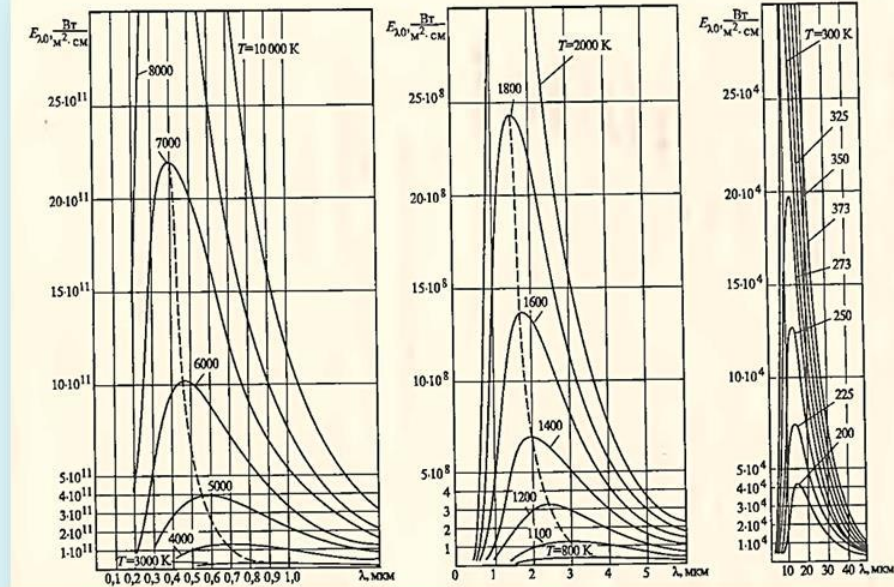
$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0,\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1} d\lambda = \sigma \cdot T^4$$



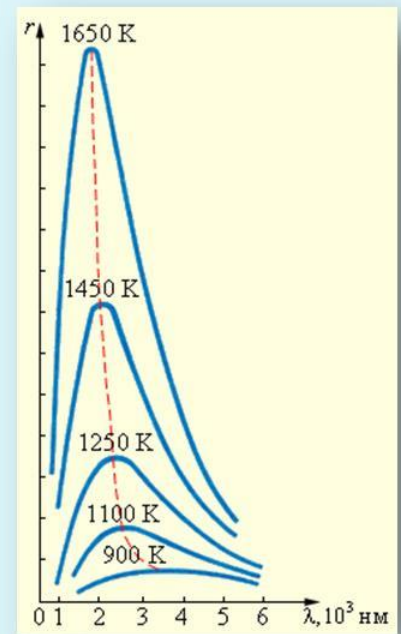
# Закон Вина

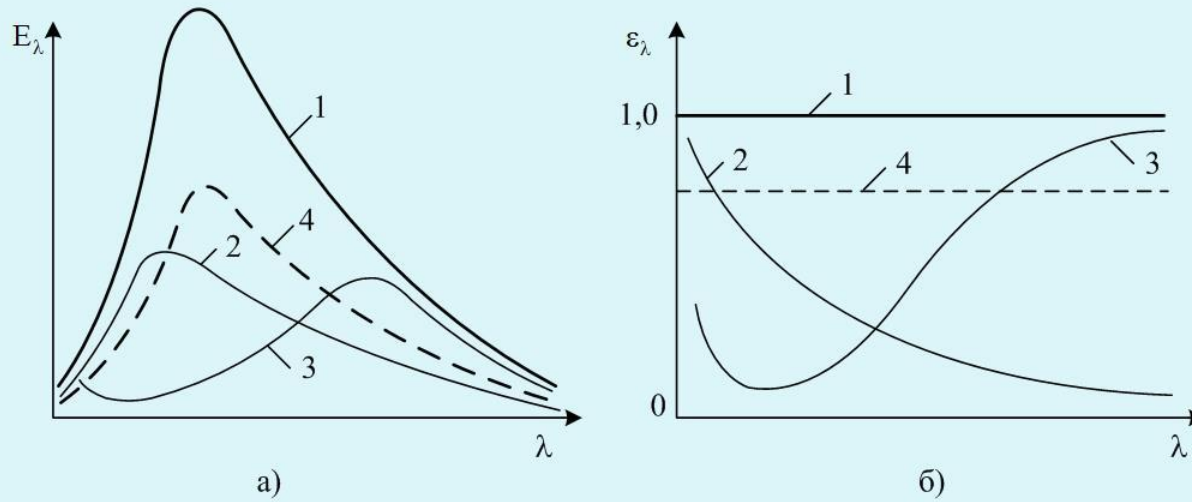
Этот закон является следствием закона Планка. Однако он был получен Вином ранее (в 1893 году) и поэтому носит его имя.

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897.82 \text{ мкм} \cdot \text{К} \approx 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$



Вильгельм Карл Вернер Отто Фриц Франц Вин (нем. Wilhelm Wien; 1864 —1928) — немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1911 г. «за открытия в области законов, управляющих тепловым излучением».





1 – АЧТ; 2 – металл; 3 – диэлектрик; 4 – серое тело

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0,\lambda}} \quad - \text{спектральной степени черноты}$$

## Закон Кирхгофа

АЧТ идеальный поглотитель  $A_\lambda = 1$  и одновременно  
идеальный излучатель  $\varepsilon_\lambda = 1$  .

Немецкий физик Кирхгоф в 1859 году:  $\frac{E_\lambda}{A_\lambda} = E_{0,\lambda}$        $\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0,\lambda}}$

$$A_\lambda = \varepsilon_\lambda$$

У серого тела такая же ф. распределения и для него

$$E_1 = \varepsilon_\lambda \cdot E_{0,\lambda} = \varepsilon_\lambda \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad E = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda \cdot E_{0,\lambda} d\lambda$$

В инженерных расчетах с целью их упрощения, как правило, излучение реальных тел моделируют излучением идеального серого тела.

$$E = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda \cdot E_{0,\lambda} d\lambda = \varepsilon \cdot \int_0^\infty E_{0,\lambda} d\lambda = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = c \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

$\varepsilon = \frac{E}{E_0}$  - интегральная степень черноты серого тела

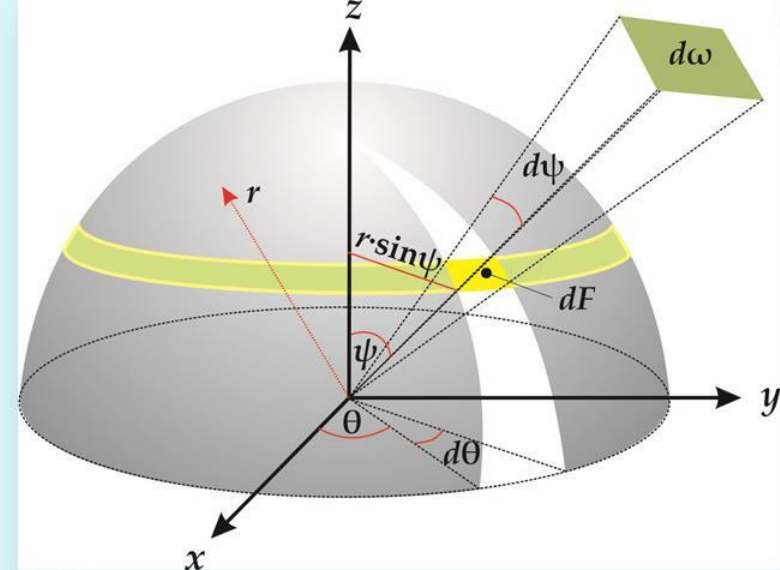
$$\frac{E}{A} = E_0$$

$$\varepsilon = A$$

Отношение излучательной способности тела к его поглотительной способности одинаково для всех серых тел, находящихся при одинаковых температурах, и равно излучательной способности АЧТ при той же температуре.

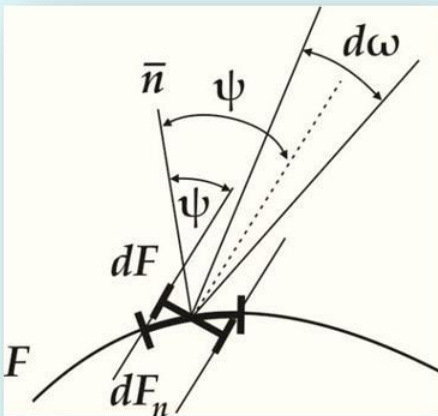
# Закон Ламберта

Вводятся интенсивность излучения  $I$  (яркость) и интенсивность падающего потока  $L$  (освещенность). Все это плотность потока, от (на) единичной площадки через единичный телесный угол.



$$\left. \begin{aligned} I_{\psi\lambda} &= \frac{dE_{\psi\lambda}}{d\omega} = \frac{d^2Q_{\psi\lambda}}{dF \cdot d\omega} \\ I_{\psi} &= \frac{dE_{\psi}}{d\omega} = \frac{d^2Q_{\psi}}{dF \cdot d\omega} \end{aligned} \right\} \text{— угловые плотности излучения}$$

Интенсивность - полный поток энергии излучения, проходящий за ед. времени через ед. площадку в направлении нормали к ней и рассчитанный на ед. телесного угла:

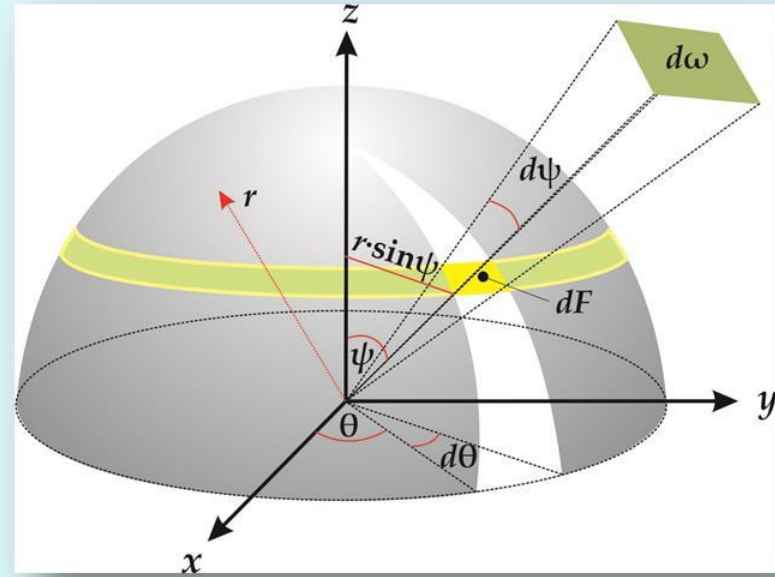


$$\begin{aligned} I_{\lambda} &= \frac{d^2Q_{\psi\lambda}}{dF_H \cdot d\omega} = \frac{d^2Q_{\psi\lambda}}{dF \cdot \cos \psi \cdot d\omega} = \frac{I_{\psi\lambda}}{\cos \psi} \\ I &= \frac{d^2Q_{\psi}}{dF_H \cdot d\omega} = \frac{d^2Q_{\psi}}{dF \cdot \cos \psi \cdot d\omega} = \frac{I_{\psi}}{\cos \psi} \end{aligned}$$

Излучение изотропное по всем направлениям – диффузным.

$$I_{\psi} = I_n \cdot \cos \psi \quad \Rightarrow \quad I = \frac{I_{\psi}}{\cos \psi} = I_n = \textit{idem}$$

$E$  – плотность интегрального потока от ед. площадки через полусферу по закону Стефана - Больцмана



$$dE_{\psi} = I_{\psi} \cdot d\omega = I \cdot \cos \psi \cdot d\omega$$

$$d\omega = \frac{dF}{r^2} \quad \Big| \quad dF = (r \cdot d\psi) \cdot (r \cdot \sin \psi \cdot d\theta) \quad \Big| \quad \Rightarrow \quad d\omega = \sin \psi \cdot d\psi \cdot d\theta$$

$$E = I \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\pi/2} \sin \psi \cdot \cos \psi \cdot d\psi = I \cdot \pi \qquad I = \frac{E}{\pi}$$

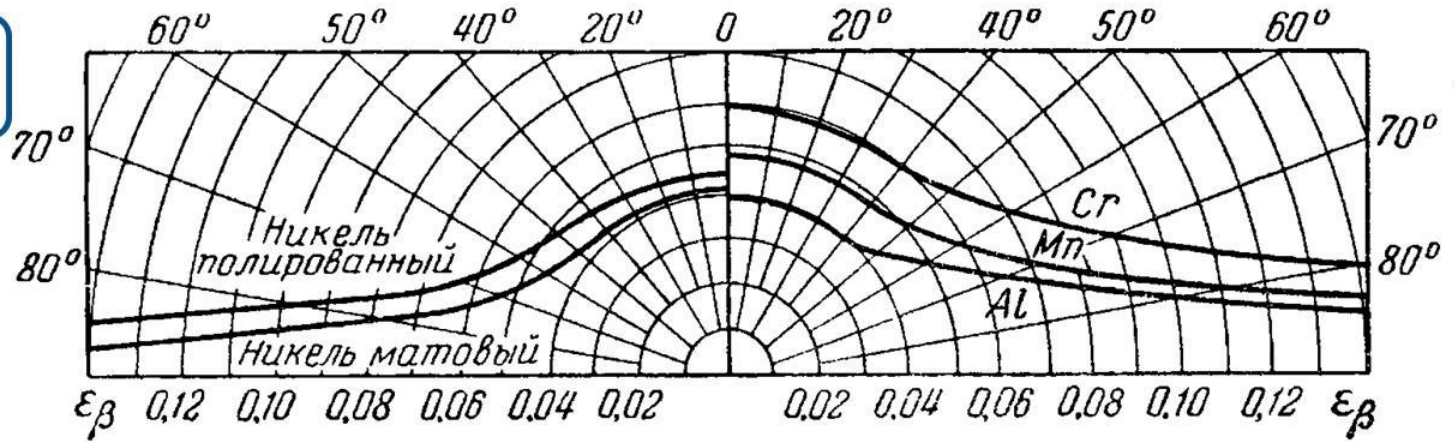
$$\left. \begin{aligned} dE_{\psi\lambda} &= \frac{E_{\lambda}}{\pi} \cdot \cos \psi \cdot d\omega \\ dE_{\psi} &= \frac{E}{\pi} \cdot \cos \psi \cdot d\omega \end{aligned} \right\} \textit{Закон Ламберта}$$

Энергия излучения в направлении нормали в  $\pi$  раз меньше плотности интегрального полусферического излучения абсолютно черного (или серого) тела, определяемого по закону Стефана-Больцмана

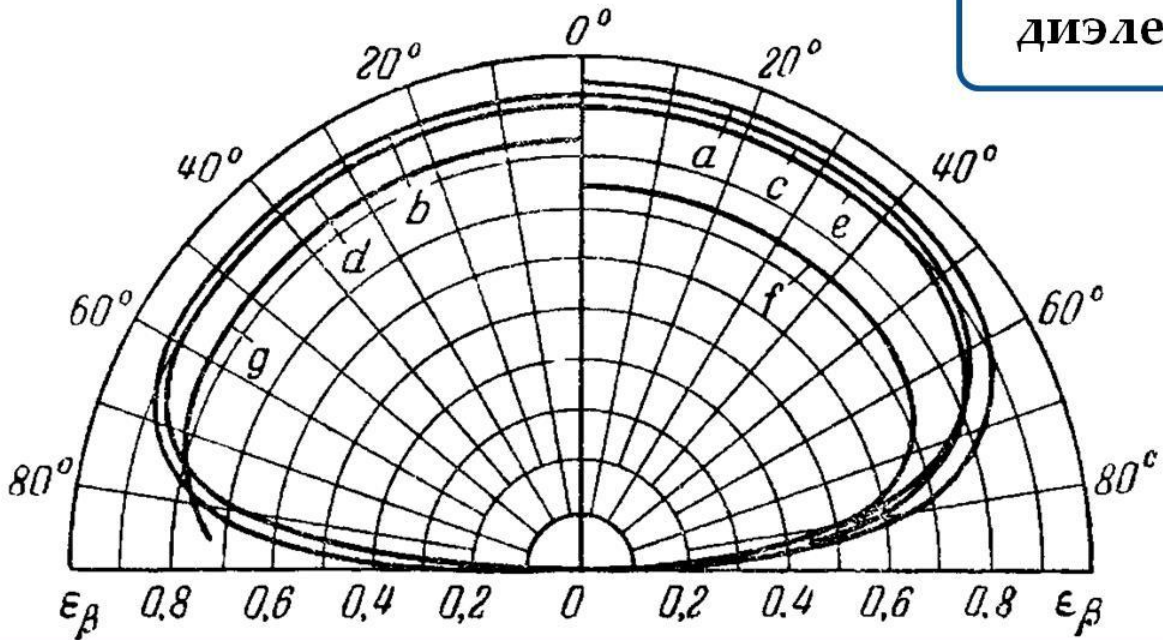


# Относительные излучательные способности в разных направлениях для реальных тел

**металлы**



**диэлектрики**



- a - тающий лед
- b - дерево
- c - стекло
- d - бумага
- e - глина
- f - окись меди
- g - грубый корунд