

# ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.



Выполнил:  
Студент II курса  
ИнХим,  
Саттаров Борис

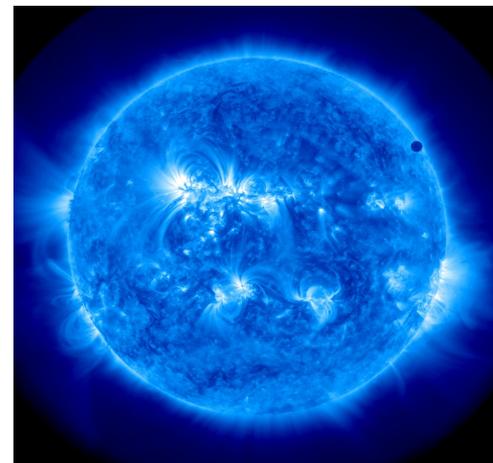
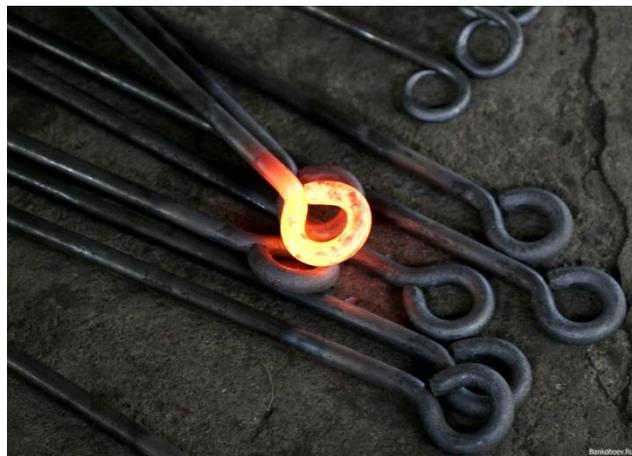
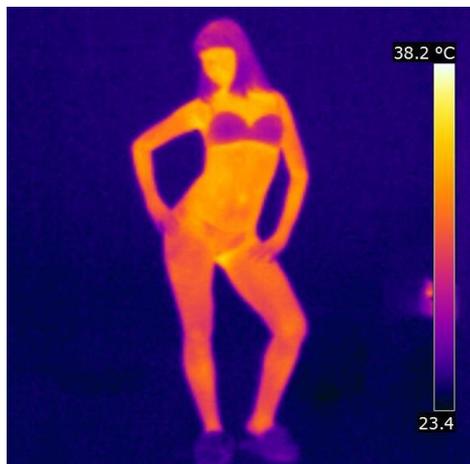
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ

**Тепловое излучение** — электромагнитное излучение, возникающее за счёт внутренней энергии тела. Имеет сплошной спектр, максимум которого зависит от температуры тела. При остывании последний смещается в длинноволновую часть спектра.

Тепловое излучение имеет место при любой температуре  $T > 0 \text{ К}$ , но при невысоких температурах излучаются практически длинные (инфракрасные) электромагнитные волны.

Часто ассоциируется с инфракрасным излучением, хотя может таковым не являться.

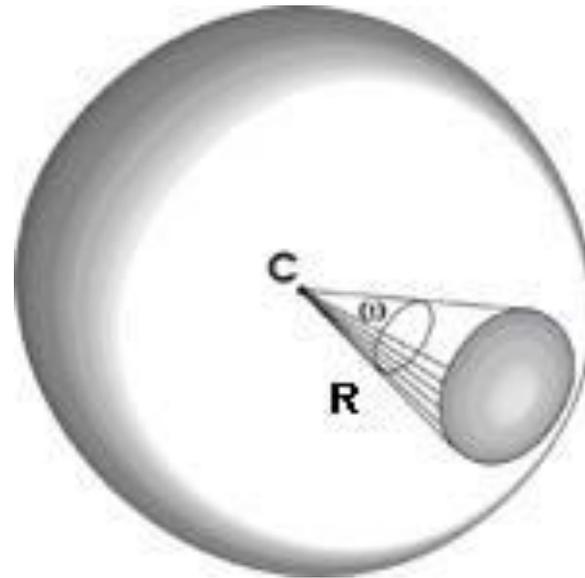
# ПРИМЕРЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



# ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

**Энергетическая светимость** – это энергия, испускаемая в единицу времени с единицы поверхности излучающего тела во всем интервале частот по всем направлениям (в пределах телесного угла  $\omega=2\pi$ )

$$R_{\omega T} = \frac{W}{St}$$



**Спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность)** – это энергия, испускаемая в единицу времени с единицы поверхности излучающего тела в узком интервале частот от  $\omega$  до  $\omega+d\omega$

$$r_{\omega T} = \frac{dR_{\omega T}}{d\omega}$$

Энергетическая светимость связана с испускательной способностью формулой:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\omega T} d\omega$$

**Поглощательная способность** – это отношение поглощенного телом потока лучистой энергии к падающему потоку этой энергии, заключенному в узком интервале частот от  $\omega$  до  $\omega+d\omega$ .

$$\alpha_{\omega T} = \frac{d\Phi_{\text{погл}}}{d\Phi_{\text{пад}}}$$

# АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО

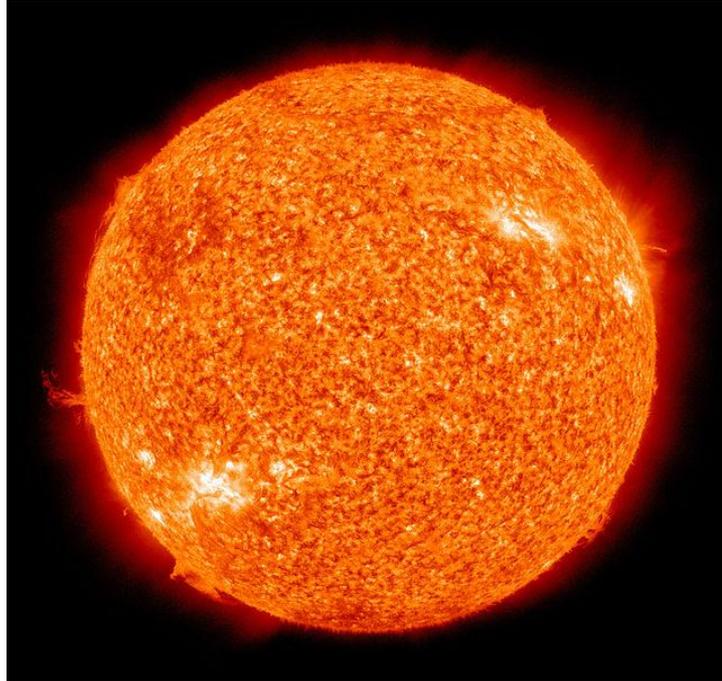
это тело, поглощательная способность которого для всех частот и температур равна:

$$\alpha_{\omega T} = 1$$

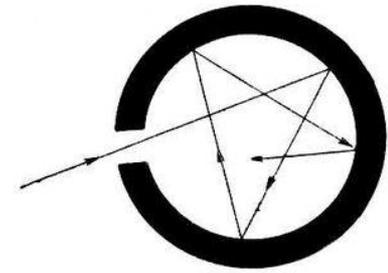
Сажа, черный бархат и платиновая чернь имеют поглощательную способность близкую к 1 лишь в ограниченном интервале частот.



**Среди тел Солнечной системы свойствами абсолютно чёрного тела в наибольшей степени обладает Солнце.**



Модель абсолютно черного тела – представляет собой почти замкнутую полость с малым отверстием.



Серое тело – это тело, для которого  $\alpha_{\omega T} = \alpha_T = \text{const} < 1$

Абсолютно белое тело – это тело, для которого  $\alpha_{\omega T} = 0$

# ЗАКОН КИРХГОФА



Густав Роберт  
Кирхгоф — один из  
великих физиков  
XIX века.

«Отношение испускательной и поглотительной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры»

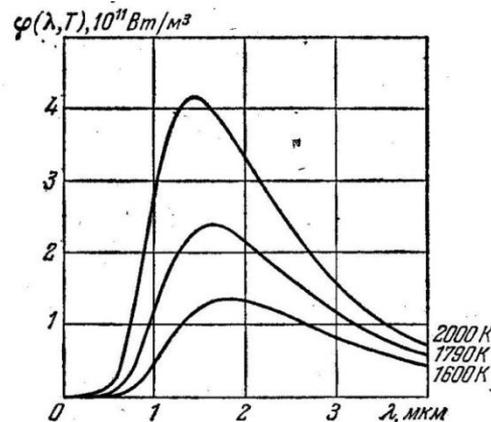
$$\left( \frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}} \right)_2 = \dots = \left( \frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}} \right)_n = f(\omega, T)$$

Чем больше испускательная способность тела, тем больше и его поглотительная способность. Это означает, что тело сильнее поглощающее какие-либо лучи будет эти лучи сильнее и испускать.

Так как для абсолютно черного тела  $\alpha_{\omega T}^{\text{ачт}} = 1$ ,

то универсальная функция Кирхгофа есть испускательная способность абсолютно черного тела  $r_{\omega T}^{\text{ачт}} = f(\omega, T)$

Кривые зависимости испускательной способности **абсолютно черного тела** от длины волны, полученные для трех значений температуры:



При теоретических исследованиях удобнее пользоваться функцией частоты  $f(\omega, T)$ , в экспериментальных работах – функцией длины волны  $\varphi(\lambda, T)$ .

Обе функции связаны друг с другом формулой:

$$f(\omega, T) = \frac{2\pi c}{\omega^2} \varphi(\lambda, T) = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \varphi(\lambda, T)$$

# ЗАКОН СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА



**Стефан Йозеф** -  
австрийский физик,  
основатель австрийской  
физической школы.



**Больцман Людвиг** -  
австрийский физик-  
теоретик.

# ЗАКОН СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Стефан (1879), анализируя экспериментальные данные, пришел к выводу, что энергетическая светимость любого тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Больцман (1884), исходя из термодинамических соображений, получил выражение для энергетической светимости абсолютно черного тела:

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

## Закон Стефана - Больцмана:

«Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры»

$$R_T = \sigma T^4$$

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

# ЗАКОН СМЕЩЕНИЯ ВИНА



Вильгельм  
Карл Вин -  
немецкий  
физик член-  
корр.  
Берлинской  
АН

Вин (1893), воспользовавшись кроме термодинамики, электромагнитной теорией, показал, что функция спектрального распределения должна иметь вид

$$f(\omega, T) = \omega^3 F\left(\frac{\omega}{T}\right) \quad \text{или} \quad \varphi(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^5} \psi(\lambda T)$$

И из данного соотношения получил закон смещения.

## Закон Вина:

«Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре»

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

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  - постоянная Вина.

# ФОРМУЛА РЭЛЕЯ-ДЖИНСА И ПОНЯТИЕ ОБ «УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ КАТАСТРОФЕ»



Джон Уильям Стрэтт Рэлей

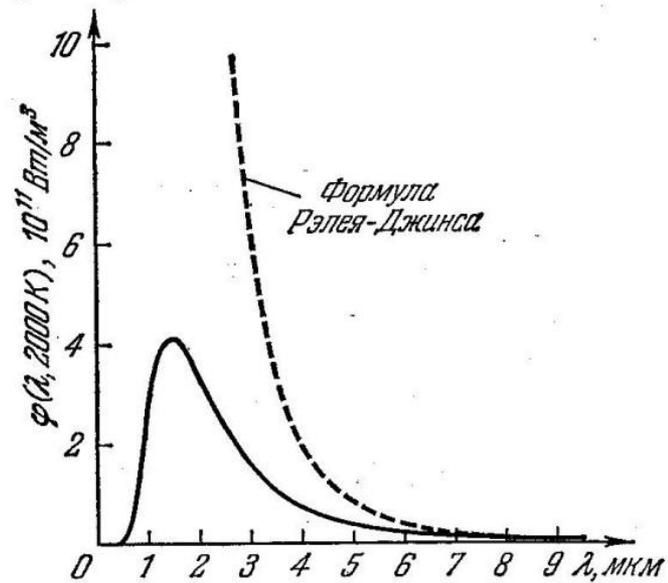


Джеймс Хопвуд Джинс

Рэлей и Джинс, исходя из теоремы классической статистики о равномерном распределении энергии по степеням свободы, приписали каждому электромагнитному колебанию энергию, равную  $kT$  и получили выражение для испускательной способности абсолютно черного тела, которое называют **формулой Рэлей-Джинса**

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

Формула удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными при больших длинах волн и резко расходится с опытом для малых длин волн (ультрафиолетовая часть спектра) (см. рис.) .



$$R_T = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \int_0^{\infty} \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT d\omega = \infty$$

Этот результат и получил название ультрафиолетовой катастрофы.

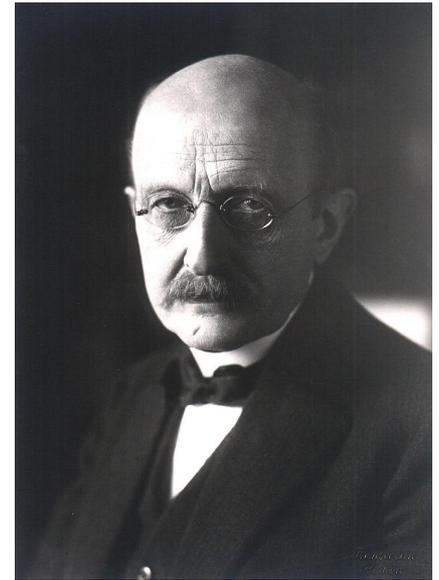
# ГИПОТЕЗА И ФОРМУЛА ПЛАНКА

## Гипотеза Планка:

Электромагнитное излучение испускается телами не непрерывно, а в виде отдельных порций энергии (квантов), величина которых

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega$$

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



Макс Карл Эрнст Людвиг Планк

# Вывод формулы Планка:

Энергия излучения  $\mathcal{E}_n = n\hbar\omega$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$

Вероятность того, что энергия колебания частоты  $\omega$  имеет значение  $\mathcal{E}_n$ , определяется выражением:

$$P_n = \frac{N_n}{N} = \frac{e^{-\mathcal{E}_n/kT}}{\sum_n e^{-\mathcal{E}_n/kT}} \quad \langle \mathcal{E} \rangle = \sum_n P_n \mathcal{E}_n = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\hbar\omega e^{-n\hbar\omega/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\hbar\omega/kT}}$$

- средняя энергия излучения частоты  $\omega$

Введем обозначение  $\frac{\hbar\omega}{kT} = x$  и допустим, что  $x$  может принимать непрерывный ряд значений.

Тогда:

$$\langle \mathcal{E} \rangle = \hbar\omega \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n e^{-nx}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx}} = -\hbar\omega \frac{d}{dx} \ln \sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx}$$

Под знаком логарифма стоит сумма членов бесконечной геометрической прогрессии, прогрессия будет убывающей по известной из алгебры формуле

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx} = \frac{1}{1 - e^{-x}}$$

Подставив это значение суммы и выполнив дифференцирование, получим:

$$\langle \mathcal{E} \rangle = -\hbar\omega \frac{d}{dx} \ln \frac{1}{1 - e^{-x}} = \hbar\omega \frac{e^{-x}}{1 - e^{-x}} = \frac{\hbar\omega}{e^x - 1} = \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$$

При  $\hbar\omega \rightarrow 0$  формула переходит в классическое выражение:

$$\langle \mathcal{E} \rangle = kT$$

Воспользовавшись формулой Рэля-Джинса, получим выражение, которое носит название **формулы Планка**:

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2} \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$$

Осуществив преобразование

$$f(\omega, T) = \frac{2\pi c}{\omega^2} \varphi(\lambda, T) = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \varphi(\lambda, T)$$

получим

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{4\pi^2\hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{2\pi\hbar c/kT\lambda} - 1}$$

# СВЯЗЬ ФОРМУЛЫ ПЛАНКА С КЛАССИЧЕСКИМИ ЗАКОНАМИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ:

1) При  $\frac{\hbar\omega}{kT} \ll 1$ ,  $\hbar\omega \ll kT$  (область малых частот)

формула Планка переходит в **формулу Рэля-Джинса**

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\hbar\omega}{kT} - 1} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot kT$$

2) При  $\frac{\hbar\omega}{kT} \gg 1$ ,  $\hbar\omega \gg kT$  (область высоких частот)

формула Планка переходит в **формулу Вина**

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}} = \omega^2 \cdot F\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

3) Для энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$R_T = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \int_0^{\infty} \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} = \frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3} T^4 = \sigma T^4$$

формула Планка приводит к **закону Стефана-Больцмана**.

Здесь  $\frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3} = \sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана

#### 4) Исследование формулы Планка на экстремум

$$\frac{d\varphi(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{4\pi^2 \hbar c^2 [(2\pi\hbar c/kT\lambda)e^{2\pi\hbar c/kT\lambda} - 5(e^{2\pi\hbar c/kT\lambda} - 1)]}{\lambda^6 (e^{2\pi\hbar c/kT\lambda} - 1)^2} = 0$$

приводит к трансцендентному уравнению

$$xe^x - 5(e^x - 1) = 0$$

решение которого дает

$$x = 4,965 \quad \text{или} \quad \frac{2\pi\hbar c}{kT\lambda_m} = 4,965$$

$$T\lambda_m = \frac{2\pi\hbar c}{4,965k} = b$$

Таким образом, формула Планка приводит к **закону смещения Вина**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

