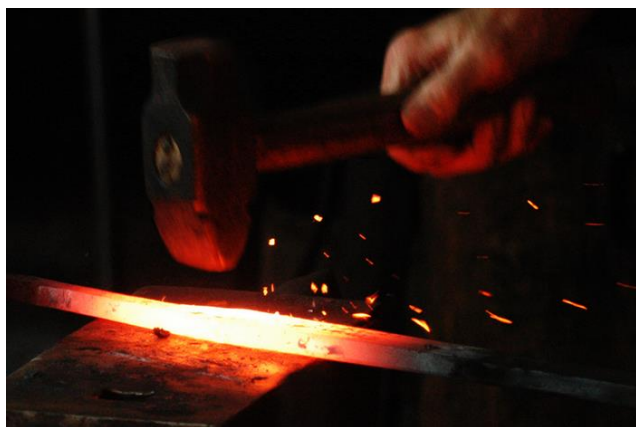


КВАНТОВАЯ ОПТИКА. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Тепловое излучение - электромагнитное излучение, которое испускают **ВСЕ** тела, температура которых **ВЫШЕ** абсолютного нуля, за счет своей **внутренней** (тепловой) энергии.

При низкой температуре тело испускает в основном длинные волны (**инфракрасное излучение**), по мере нагрева тела в излучении начинают преобладать короткие волны.



Цвет	Температура, К
Красный, едва видимый	823
Темно-красный	973
Вишнево-красный	1 173
Оранжевый	1 373
Белый	1 673 и выше

Все остальные виды свечения, возбуждаемые за счет любого вида энергии, кроме **внутренней** (тепловой) относятся к **люминесценции**

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ – это свечение, сопровождающее разряд



ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ – это свечение, происходящее за счёт выделения энергии при некоторых химических реакциях



ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ



Тепловое излучение:

- единственное из всех видов излучений, которое может находиться в равновесии с излучающим телом.
- лежит в **оптическом диапазоне длин волн** и подразделяется на:

инфракрасное ($10^{-2} - 7,6 \cdot 10^{-7}$) м;

видимое ($7,6 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$) м;

ультрафиолетовое ($4 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-9}$) м.

Равновесное излучение – процесс, при котором распределение энергии между телом и излучением остается неизменным для каждой длины волны (сколько энергии излучается, столько и поглощается для данной длины волны).

Характеристики теплового излучения

1. **Поток излучения Φ** – средняя мощность излучения.

Поток излучения – энергия, **излучаемая за 1с** во **всем** диапазоне длин волн.

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \quad [\text{Вт}] \quad (1)$$

W- энергия

t- время

2. **Энергетическая светимость R_T** - энергия, **излучаемая 1 м²** поверхности тела за **1с** во **всем** диапазоне длин волн.

$$R_T = \frac{d\Phi}{dS}$$

[Вт/м²]

$$R_T = \frac{dW}{dSdt}$$

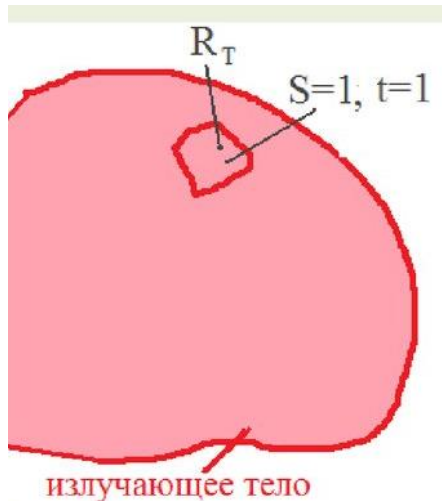
Энергетическая светимость

[Дж/(м²·с)]

(2)

S- площадь излучающей поверхности

И поток излучения, и энергетическая светимость зависят от природы тела и его температуры.



3. **Спектральная плотность энергетической светимости (излучательная способность)** $r_{\nu T}$ ($r_{\lambda T}$) - энергия теплового излучения, испускаемая 1 м^2 поверхности за 1 с в единичном интервале частот (или длин волн).

$$r_{\nu T} = \frac{dR_T}{d\nu} \quad (3)$$

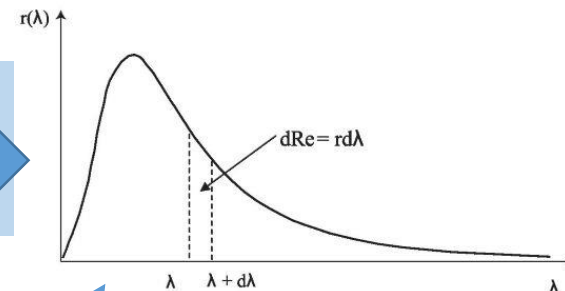
или

$$r_{\lambda T} = \frac{dR_T}{d\lambda} \quad (4)$$

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

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

Зависимость спектральной плотности энергетической светимости от длины волны называют **спектром излучения тела**.



Полная энергетическая светимость тела равна:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\nu T} d\nu \quad (5)$$

или

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda \quad (6)$$

Площадь под кривой $r(\lambda)$ численно равна энергетической светимости

4. Поглощательная способность $\alpha_{\lambda T}$ -

отношение потока излучения, поглощенного данным телом, к величине падающего монохроматического потока:

$$\alpha_{\lambda T} = \frac{d\Phi_{\lambda, \text{погл}}}{d\Phi_{\lambda, \text{пад}}} \quad (7)$$

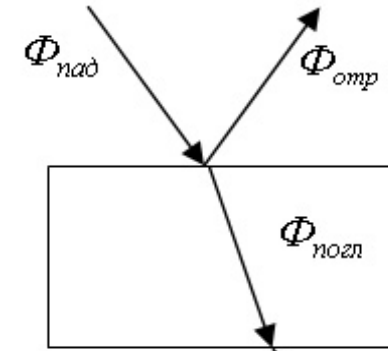
$$\alpha_{\lambda T} \leq 1$$

$d\Phi_{\lambda, \text{пад}}$ – падающий на поверхность тела поток *монохроматического* излучения с длиной волны λ ;

$d\Phi_{\lambda, \text{погл}}$ – часть потока, которая поглощается телом.

$$\beta_{\lambda T} = \frac{d\Phi_{\lambda, \text{отр}}}{d\Phi_{\lambda, \text{пад}}}$$

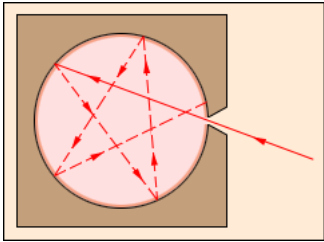
- отражательная способность



Тело, для которого $\alpha_{\lambda T} \equiv 1$ и не зависит от длины волны излучения, называют абсолютно черным (АЧТ).

АЧТ поглощает все падающее на него излучение.

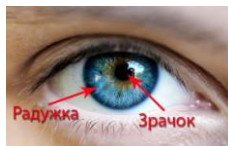
Тело, для которого $\alpha_{\lambda T} \equiv \alpha_T = \text{const} < 1$ для всех λ , называют серым телом.



Модель АЧТ- замкнутая полость с небольшим отверстием.

Луч, попавший в это отверстие, после многократных отражений от стенок поглощается практически полностью.

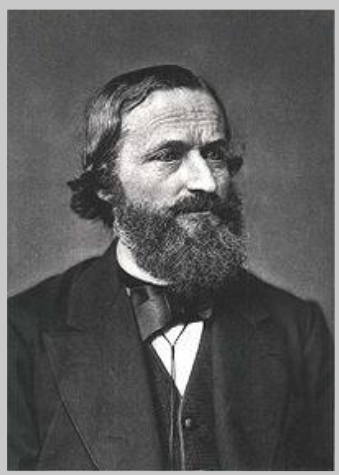
ПРИМЕР: сажа,
платиновая чернь



ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Закон Кирхгофа

Количественная связь между излучением и поглощением установлена *Г. Кирхгофом* (1859).



Густав Кирхгоф
1824-1887

Отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел и равно спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$\left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} \right)_2 = \frac{E_{\lambda T}}{\alpha_T} = E_{\lambda T} = f(\lambda, T)$$

- закон Кирхгофа

(8)

$E_{\lambda T}$ -испускательная способность АЧТ

$\alpha_T = 1$ -поглощательная способность АЧТ

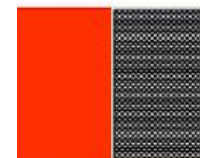
универсальная
функция длины волны
и температуры

Следствия из закона Кирхгофа:

1. $r_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} E_{\lambda T} < E_{\lambda T}$ (энергетическая светимость АЧТ наибольшая)
2. Тело, которое лучше поглощает, должно интенсивнее и излучать.
3. Самый совершенный излучатель – абсолютно черное тело.



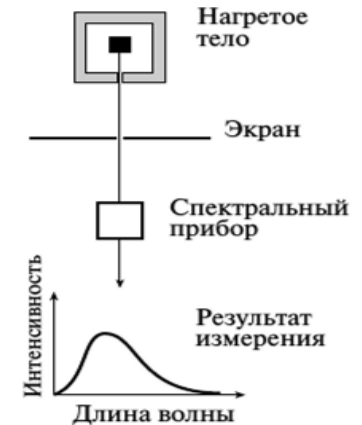
Низкая T



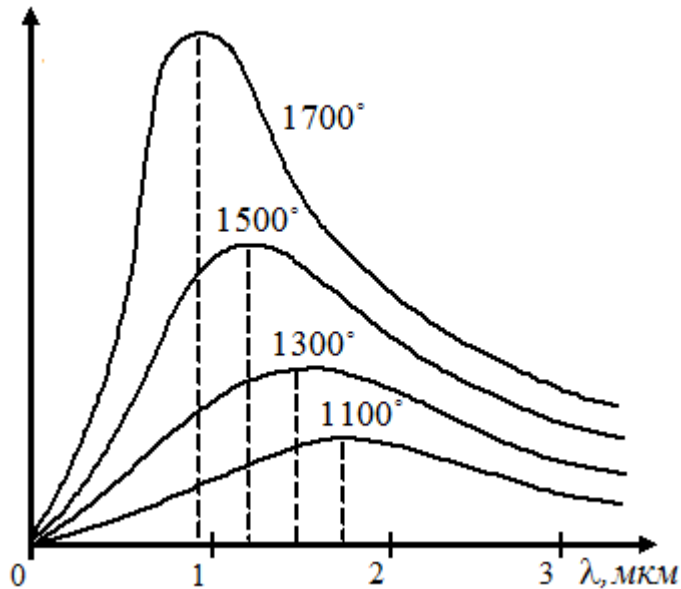
Высокая T

Наиболее трудной задачей для теоретической физики конца XIX века было **объяснение распределения энергии в спектре излучения АЧТ**.

Экспериментально получены кривые распределения энергии в спектре излучения черного тела.



$E_{\lambda T}$

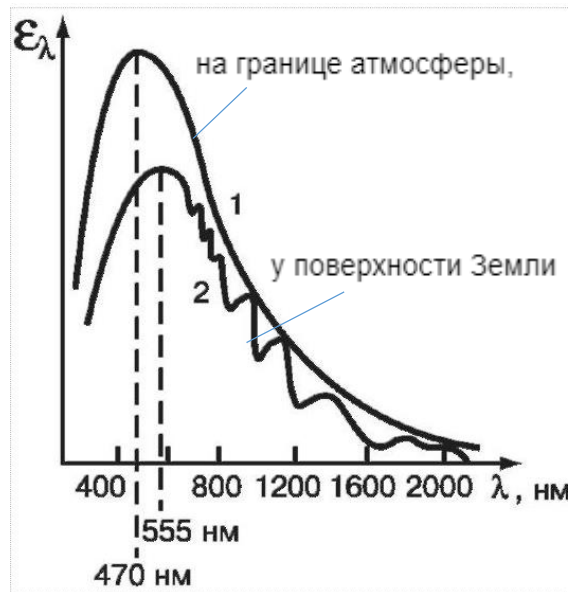
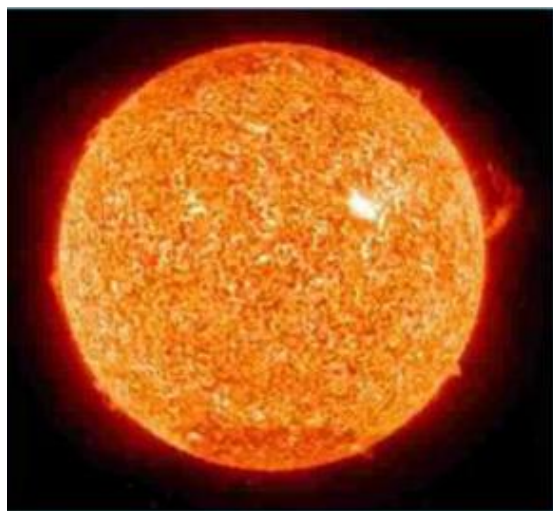


ВЫВОДЫ из анализа экспериментальных кривых:

1. Спектр излучения АЧТ – **сплошной**.
2. Распределение энергии в спектре излучения неравномерное. Кривые имеют явный максимум. Максимальное значение $E_{\lambda T}$ сильно зависит от температуры.
3. Различным значениям температуры соответствуют различные длины волн, на которых интенсивность излучения АЧТ максимальна.
4. Энергетическая светимость R (равная площади под кривой) сильно зависит от температуры.

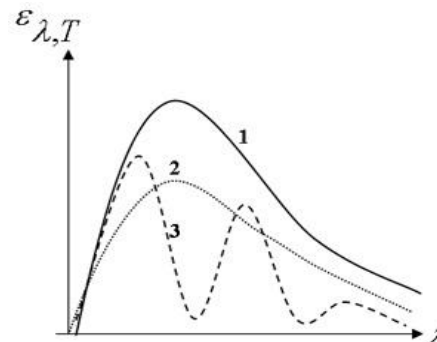
Солнце как абсолютно черное тело

Абсолютно черное тело может быть совсем не черным, а даже очень ярким.

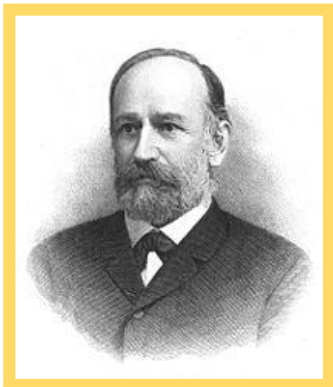


Характерным примером **ЯРКОГО** абсолютно черного тела является фотосфера (видимая поверхность) нашего Солнца, которая излучает энергию как абсолютно черное тело с $T \sim 6000^\circ \text{K}$. Максимум излучения приходится на длину волны $\lambda \approx 550 \text{ нм}$.

Кривые распределения энергии в спектрах теплового излучения различных тел (1 – абсолютно черное тело, 2 – серое тело, 3 – произвольное тело)

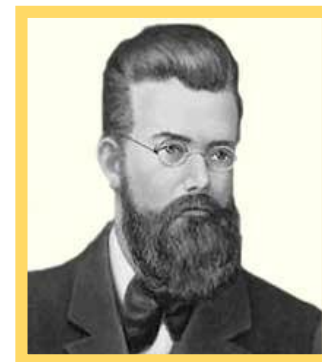


Закон Стефана-Больцмана



Йозеф Стефан
1835 – 1893

В 1879 г. Й. Стефан экспериментально, а в 1884 г. Л. Больцман теоретически установили зависимость *энергетической светимости* АЧТ от температуры:



**Людвиг
Бóльцман**
1844 —1906

Энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

$$R_T = \sigma T^4 \quad \text{- закон Стефана-Больцмана} \quad (9)$$

T – абсолютная температура

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

Для серого тела

$$R'_T = \alpha \sigma T^4 \quad (10)$$

α – коэффициент поглощения

Закон смещения Вина

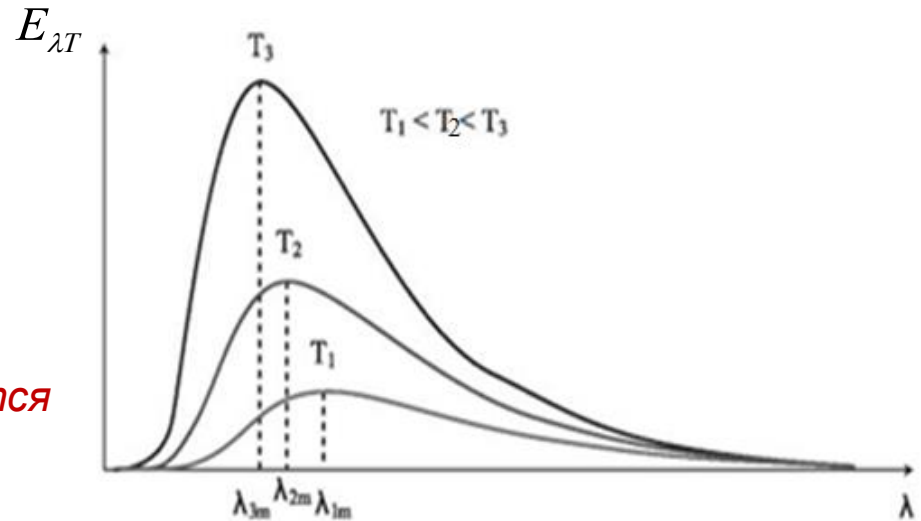
Немецкий физик В. Вин (1893) установил формулу для длины волны, на которую приходится максимум *испускательной способности* АЧТ.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (11)$$

- закон смещения Вина

$b = 2,9 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная в законе смещения Вина

λ_{\max} - длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности АЧТ



Длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности АЧТ, с ростом температуры смещается в сторону более коротких длин волн.

Формула Рэля-Джинса

Теоретически вид функции $E_{\lambda T} = f(\lambda, T)$ на основе законов классической физики получили английские ученые Рэлей и Джинс:

$$E(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

-формула Рэля-Джинса

(12)

c – скорость света

k – постоянная Больцмана

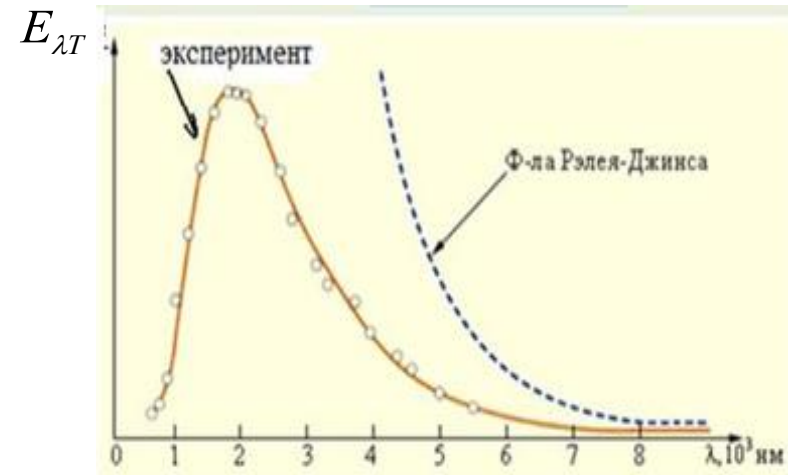
▪ Эта формула **согласуется** с экспериментальными результатами только в **области больших длин волн (малых частот)**.

Абсурдные выводы из формулы Рэля-Джинса:

1. Полная энергия излучения АЧТ должна быть бесконечно большой

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

2. Интенсивность излучения должна возрасти пропорционально квадрату частоты (в тепловом излучении должно быть много ультрафиолетовых и рентгеновских лучей) - **чего на самом деле не наблюдается**.



▪ Затруднения в согласовании теории с экспериментом (особенно для излучения высоких частот) получили название **«ультрафиолетовая катастрофа»**.



Max Planck

Гипотеза Планка. Формула Планка

В 1900г. немецкий физик **Макс Планк** высказал гипотезу о том, что **атомы излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями – квантами.**

$$\varepsilon = h\nu \quad \text{- энергия кванта} \quad (13)$$

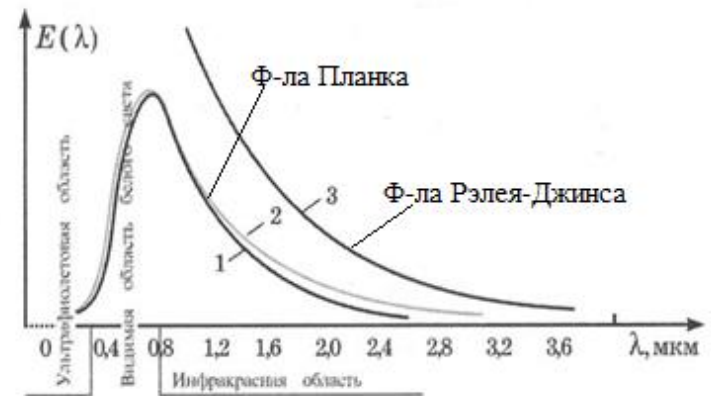
$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - **постоянная Планка**

ν - **частота излучения**

$$E(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{- формула Планка} \quad (14)$$

Формула Планка:

- хорошо согласуется с экспериментальными данными при всех T во всем диапазоне частот (или длин волн);
- содержит в себе частные законы теплового излучения;
- позволяет вычислить постоянные Стефана-Больцмана и Вина.



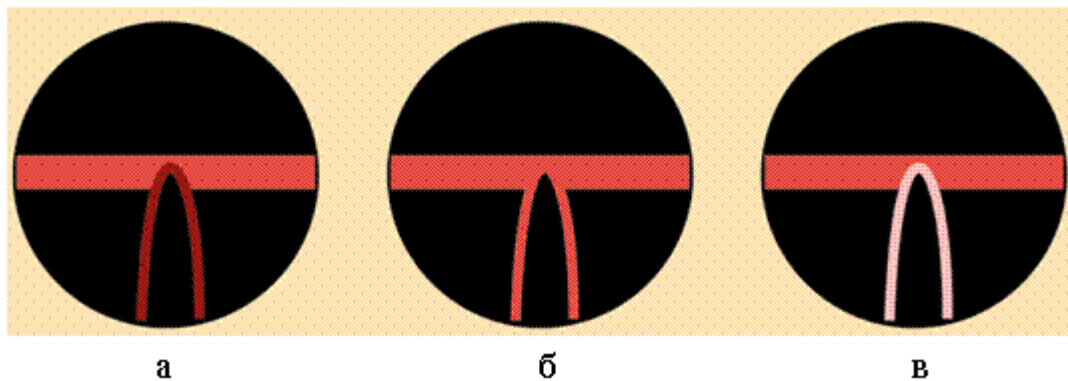
Формула Планка положила начало развитию **квантовой физики.**

Применение теплового излучения

1. Тепловые источники света (лампы накаливания)



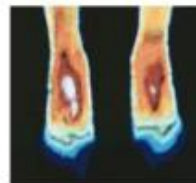
2. Оптическая пирометрия - метод определения температуры по спектру излучения сильно нагретых тел, которые отдалены от наблюдателя.



Применение ИК лучей



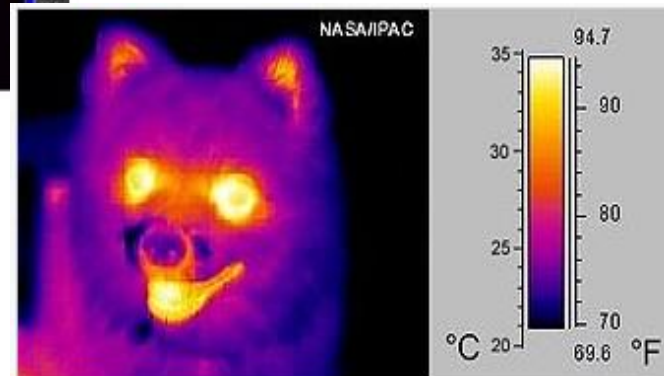
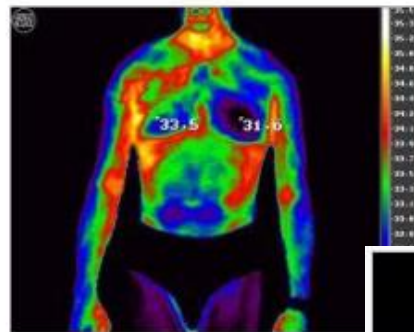
Приборы ночного видения



Тепловидение



Обогревательные приборы



Изображение собаки, сделанное тепловизором

приборы ночного видения



Тесты

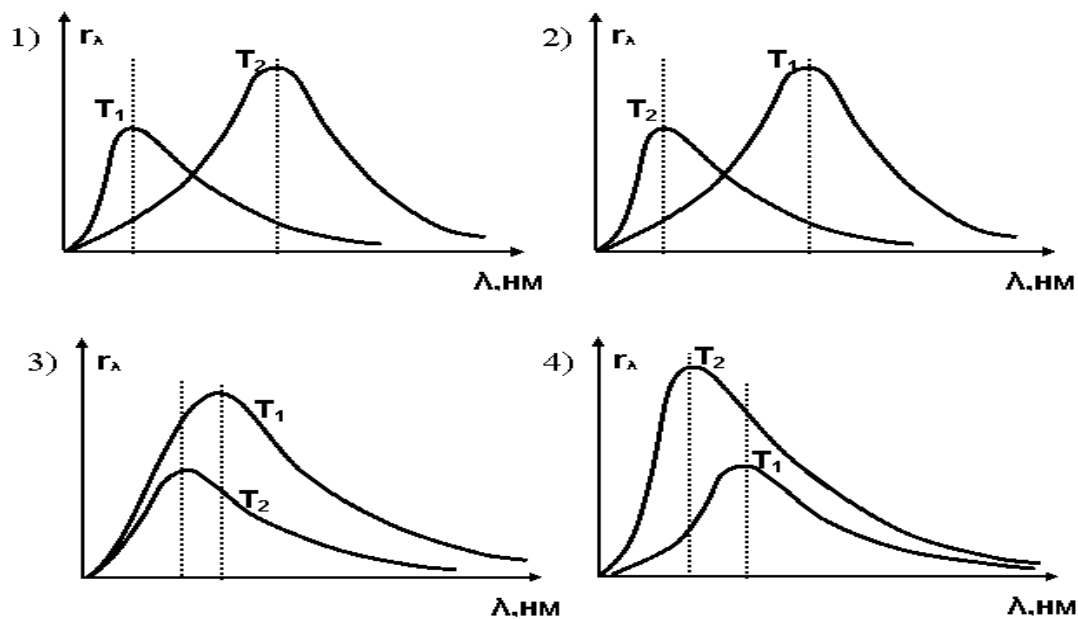
1. ТЕЛО ВЫГЛЯДИТ БЕЛЫМ, ПОТОМУ ЧТО

- A) отражает мало света
- B) поглощает свет в видимом диапазоне волн
- C) не одинаково излучает энергию в различных диапазонах длин волн
- D) отражает свет во всем видимом диапазоне длин волны

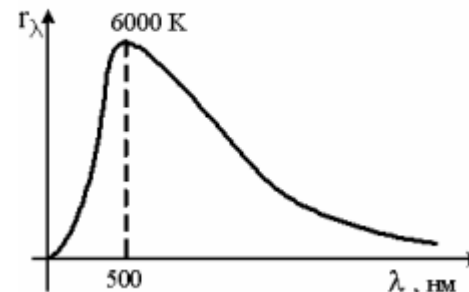
2. СПЕЦОДЕЖДУ СТАЛЕВАРОВ И МАРТЕНЩИКОВ ПОКРЫВАЮТ СЛОЕМ ФОЛЬГИ, ЧТОБЫ ОНА

- A) отражала ультрафиолетовое излучение
- B) отражала видимое излучение
- C) отражала инфракрасное излучение
- D) поглощала все падающее излучение

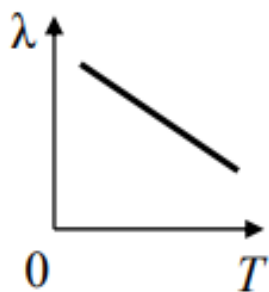
3. На рисунках по оси абсцисс отложена длина волны теплового излучения абсолютно чёрного тела, а по оси ординат отложена его излучательная способность. Кривые соответствуют двум температурам, причем $T_1 < T_2$. На качественном уровне правильно отражает законы излучения абсолютно чёрного тела рисунок



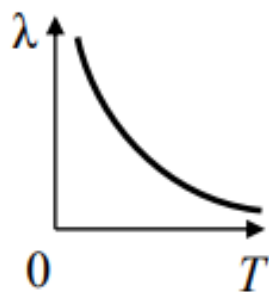
4. На рисунке показана кривая зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при $T=6000\text{K}$. Найти длину волны, соответствующую максимуму излучения абсолютно черного тела при уменьшении температуры тела в 2 раза. Как изменится при этом площадь под кривой?



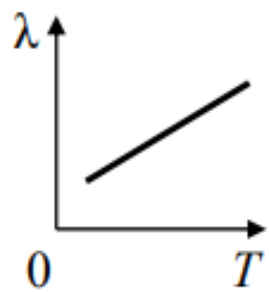
5. Зависимость длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, от температуры правильно представлена на рисунке ...



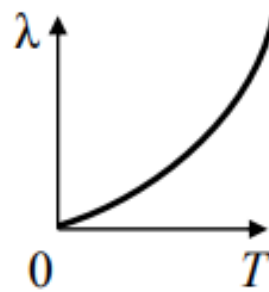
а



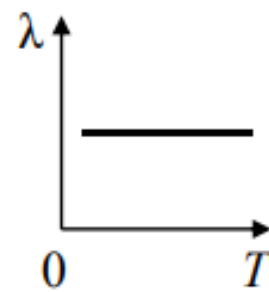
б



в



г



д