

Тепловое излучение

§1. Виды излучения. Тепловое излучение

§2. Энергетические характеристики излучения

§3. Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа

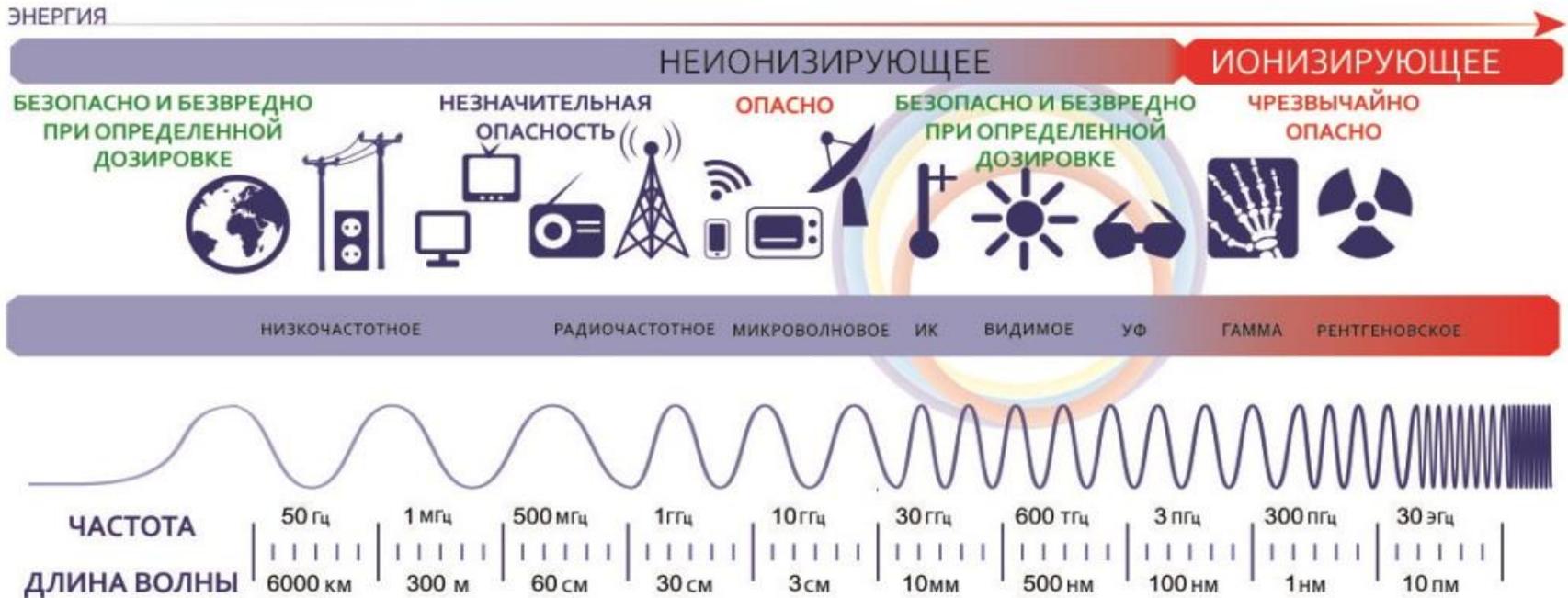
§4. Закон Стефана-Больцмана

§5. Законы Вина

§6. Формула Рэлея-Джинса

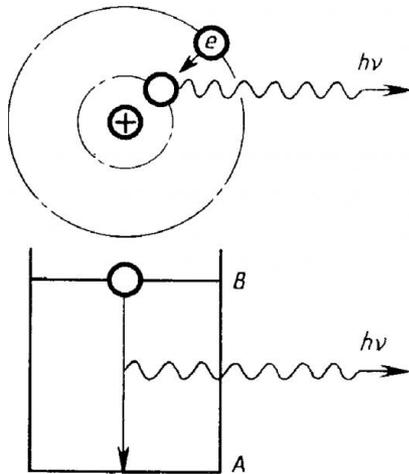
§7. Гипотеза о квантах. Формула Планка

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ И НЕИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



В физике **излучение** – это передача энергии в форме **волн или частиц** через пространство или через материальную среду:

- электромагнитное излучение
- излучение частиц
- акустическое излучение
- гравитационное излучение



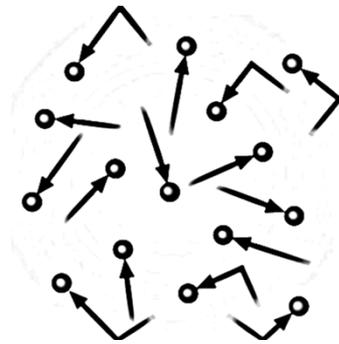
Тепловое излучение – это ЭМИ за счет внутренней энергии излучающего тела, т.е. за счет энергии теплового движения атомов ИЛИ молекул вещества

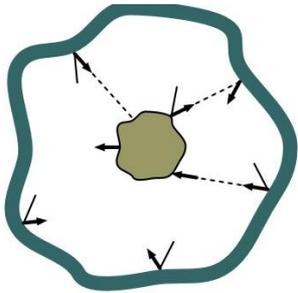
Тепловое излучение присуще всем телам при любой температуре, отличной от абсолютного нуля

Нагретое тело испускает некоторое количество энергии излучения в любом диапазоне частот или длин волн, однако распределение энергии излучения тела по спектру существенно зависит от температуры.

Максимум энергии излучения:

- батарея центрального отопления (350 К) – инфракрасно излучение
- раскаленная поверхность Солнца (6000 К) – видимый диапазон
- ядерный взрыв (1000000 К) – рентгеновское и гамма-излучение





Тепловое излучение — единственный вид излучения, которое может находиться в термодинамическом равновесии с веществом и само быть при этом в состоянии термодинамического равновесия

Излучение — равновесно, если распределение энергии между телом и излучением не меняется для каждой длины волны. Способность теплового излучения быть в равновесии вызвана тем, что интенсивность этого излучения возрастает с температурой

Равновесное тепловое излучение однородно, изотропно и неполяризовано

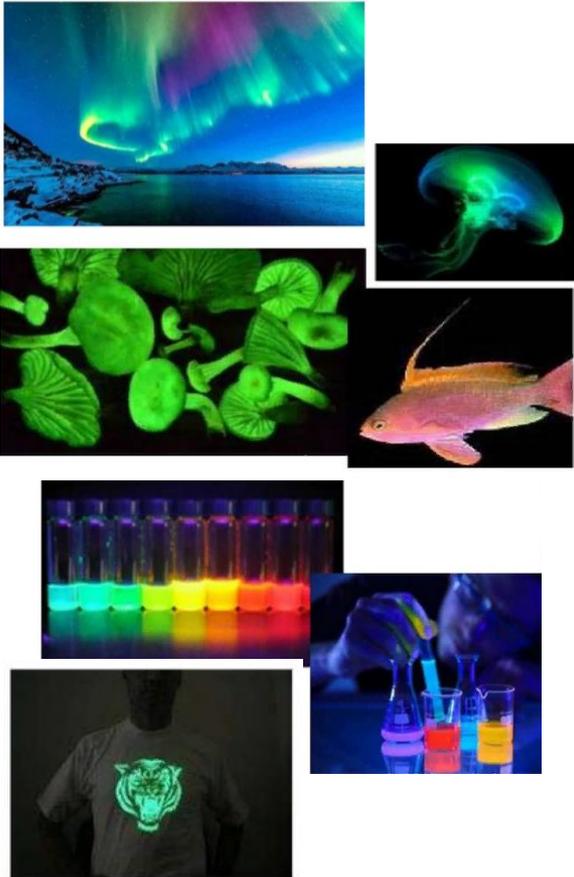
Тепловое = температурное = равновесное
(≠ИК в физике, = ИК в быту)

Все остальные виды излучения неравновесны →

Люминесценция – неравновесное излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела и продолжающееся в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний

По типу возбуждения:

- **Фотолюминесценция** – свечение под действием световых лучей оптического диапазона частот – УФ и видимых
- **Рентгенолюминесценция** возникает в веществах, облучаемых рентгеновским излучением
- **Катодолюминесценция** – свечение, вызываемое облучением кристалла электронами
- **Электролюминесценция** – свечение, возникающее под действием приложенного электрического поля
- **Радиоломинесценция** – свечение под действием продуктов радиоактивного распада
- **Триболюминесценция** – люминесценция при трении
- **Кристаллолюминесценция** – люминесценция, наблюдаемая при раздавливании кристаллов
- **Хемилюминесценция** – свечение продуктов химических реакций (напр., **биоломинесценция**)
- **Сонолюминесценция** – люминесценция при прохождении ультразвуковых волн



Быстро затухающая люминесценция – **флуоресценция**, длительная люминесценция – **фосфоресценция**

§2. Энергетические характеристики излучения

Термодинамическое равновесие:

тела имеют одинаковую температуру, а излучение – **объемную плотность энергии, распределение** которой по длинам волн не зависит от природы тел и стенок, а **определяется лишь их температурой**

$$w = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu_0 H^2}{2} - \text{объемная плотность энергии}$$

– количество энергии излучения, приходящееся на единицу объема

$$u_\omega(T) = \frac{du}{d\omega}$$

– **спектральная плотность** объемной плотности энергии

– энергия излучения в единице объема, приходящаяся на единичный интервал частот

$$\frac{dw}{d\omega} \rightarrow : \left(u \equiv w = \frac{dW}{dV} \right)$$

$$u = u(T)$$

$$[u] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

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

$$[u_\omega] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м}^3}$$

Интегральные характеристики

$$\Phi = \frac{dW}{dt}$$

– **поток энергии**
(**мощность излучения**)

– количество энергии, излучаемое в единицу времени во всех направлениях во всем диапазоне длин волн (частот)

$$[\Phi] = \text{Вт}$$

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

– **энергетическая светимость**
(**излучательная способность,**
интегральная испускательная
способность)

– поток энергии, **испускаемый** единицей площади поверхности тела во всех направлениях во всем диапазоне длин волн (частот)

– поверхностная плотность испускаемого потока энергии
(мощности излучения)

$$\Phi = \int R dS$$

$$R = R(T)$$

$$[R] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Спектральные характеристики

$$r_\omega = \frac{dR}{d\omega}$$

– **спектральная плотность энергетической светимости**
(спектральная (луче)испускательная способность)

– поток энергии, испускаемый в единичном интервале частот единицей поверхности тела

– мощность излучения единицы площади в единичном интервале частот

$$R = \int_0^\infty r_\omega d\omega$$

$$r = r(\omega, T)$$

$$[r_\omega] = \frac{\text{Дж}}{\text{М}^2}$$

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$r_\nu = \frac{dR}{d\nu}$$

$$r_\lambda = \frac{dR}{d\lambda}$$

$$r_\omega \neq r_\lambda$$

$$R = \int_0^\infty r_\omega d\omega = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda$$

$$r_\omega d\omega = r_\lambda d\lambda$$

$$d\lambda = \left| -\frac{2\pi c}{\omega^2} \right| d\omega$$

$$d\lambda = \left| -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \right| d\omega$$

$$d\lambda = \left| -\frac{c}{\nu^2} \right| d\nu$$

$$d\lambda = \left| -\frac{\lambda^2}{c} \right| d\nu$$

$$r_\omega = r_\lambda \cdot \frac{\lambda^2}{2\pi c}$$

Спектральные характеристики

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

– **поглощательная способность**
(спектральный коэффициент поглощения)

– доля падающего потока, поглощаемая телом в заданном интервале частот

– отношение энергии, поглощенной поверхностью тела, к энергии, падающей на поверхность тела; обе энергии берутся в расчете на единицу площади, единицу времени и единичный интервал частот

$$a = a(\omega, T)$$

$$a \leq 1$$

Полная поглощательная способность тела – отношение энергии, поглощаемой телом, ко **всей** падающей на него энергии

| № п/п | Материал | Излучательная способность (ε) |
|-------|---|-------------------------------|
| 1 | Алюминий | 0,2÷0,3 |
| 2 | Медь | 0,6÷0,8 |
| 3 | Сталь | 0,56÷0,8 |
| 4 | Чугун | 0,54÷0,78 |
| 5 | Вода | 0,93 |
| 6 | Лак черный маговый | 0,96÷0,98 |
| 7 | Стекло | 0,8 |
| 8 | Асфальт, гравий, керамика, дерево, резина, сажа, штукатурка, краски масляные различных цветов | 0,95 |

Таблица 12.1. Оптические свойства поглотителей

| Материал | | Солнечное излучение | | Длинноволновое ИК-излучение | |
|---------------------------|---------------------|------------------------|----------|-----------------------------|----------|
| | | $\alpha_s(\epsilon_s)$ | ρ_s | $\alpha_l(\epsilon_l)$ | ρ_l |
| Селективный поглотитель | черный никель | 0,88 | 0,12 | 0,07 | 0,93 |
| | черный хром | 0,87 | 0,13 | 0,09 | 0,91 |
| | алюминий | 0,70 | 0,30 | 0,07 | 0,93 |
| | нитрид/оксид титана | 0,95 | 0,05 | 0,05 | 0,95 |
| Неселективный поглотитель | | 0,97 | 0,03 | 0,97 | 0,97 |

Абсолютно черное тело

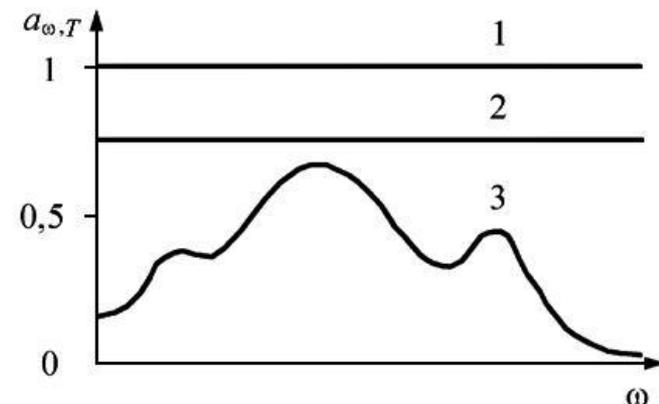
$a = 1$
 $\forall (\nu, T)$ Тело называется **абсолютно черным** (АЧТ), если оно при любой температуре полностью поглощает всю энергию падающих на него ЭМВ независимо от их длины волны (частоты) и направления падения

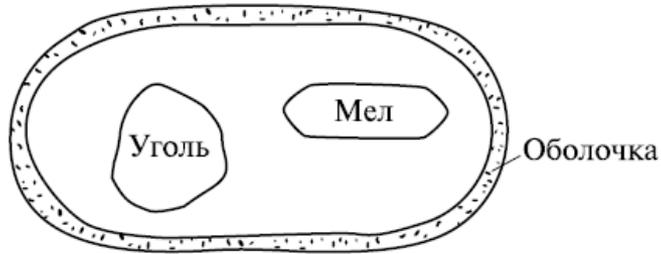
$a = f(T) < 1$
 $\forall \nu$ Тело, называется **серым**, если его поглощательная способность одинакова для всех длин волн (частот) и зависит только от температуры, химического состава тела, состояния поверхности

$a = 0$
 $\forall (\nu, T)$ Тело называется **абсолютно белым**, если оно при любой температуре абсолютно не поглощает падающее на него ЭМИ независимо от его длины волны (частоты) и направления падения

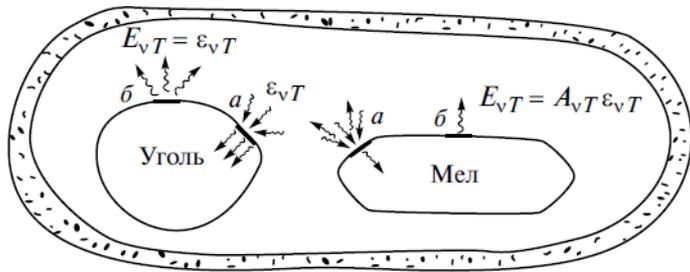
Как белое сделать черным. Natürlich!

<http://www.youtube.com/watch?v=l-66WYjOB1s&list=PLWWM8IO-3TQjNnOsEb5lODZRc3cKp0aUSL&index=1>





Правило Прево:
если два тела поглощают разные количества энергии, то и их испускание различно



Тела, интенсивнее поглощающие излучение какой-либо частоты, будут это излучение интенсивнее и испускать

Закон Кирхгофа

Отношение испускательной и поглощательной способностей одинаково для всех тел в природе, включая АЧТ, и при данной температуре является одной и той же универсальной функцией частоты (длины волны)

$$\left(\frac{r_{\omega}}{a_{\omega}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega}}{a_{\omega}}\right)_2 = \dots = \left(\frac{r_{\omega}}{a_{\omega}}\right)_{\text{АЧТ}} = f(\omega, T)$$

Следствия закона Кирхгофа:

$$\left(\frac{r_{\omega}}{a_{\omega}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega}}{a_{\omega}}\right)_2 = \dots = \left(\frac{r_{\omega}}{a_{\omega}}\right)_{\text{АЧТ}} = f(\omega, T)$$

$$(a_{\omega})_{\text{АЧТ}} = 1 \quad (r_{\omega})_{\text{АЧТ}} = f(\omega, T)$$

– универсальная функция Кирхгофа
есть испускательная способность АЧТ

$r_{\omega} = a_{\omega} \cdot f(\omega, T) = a_{\omega} \cdot (r_{\omega})_{\text{АЧТ}} < (r_{\omega})_{\text{АЧТ}}$ – из всех тел максимальной
испускательной способностью при
данной температуре обладает АЧТ

– знание аналитического вида функции $(r_{\omega})_{\text{АЧТ}}$ открывает возможность
рассчитать испускательную способность для любого тела, если известна
его поглощательная способность, определяемая экспериментально

Походная фляга или закон Кирхгофа

<https://www.youtube.com/watch?v=ShDgf3GsiZc&list=PLWWM8IO-3TQjNnOsEb5l0DZRc3cKp0aUSL&index=2>

Алюминизированное покрытие
имеет гораздо более высокий
уровень защиты от теплового
излучения



Закон Стефана-Больцмана:

– энергетическая светимость **АЧТ**
пропорциональна четвертой степени
его абсолютной температуры

$$R = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Пирометр – прибор для бесконтактного (дистанционного) измерения температуры раскаленных тел



Радиационный пирометр оценивают температуру посредством пересчитанного показателя мощности теплового излучения

Коэффициент излучения представляет собой отношение мощности текущего температурного излучения к такому же показателю эталонного АЧТ

| Объект измерения | Коэффициент излучения | Объект измерения | Коэффициент излучения |
|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Асфальт | 0,90...0,98 | Ткань чёрная | 0,98 |
| Бетон | 0,94 | Текстиль | 0,90 |
| Цемент | 0,96 | Человеч. кожа | 0,98 |
| Песок | 0,90 | Древесн. уголь | 0,96 |
| Земля; вода | 0,92...0,96 | Лак | 0,80...0,95 |
| Лед | 0,96...0,98 | Лак матовый | 0,97 |
| Снег | 0,83 | Резина чёрная | 0,94 |
| Стекло, керамика | 0,90...0,94 | Пластмасса | 0,85...0,95 |
| Мрамор | 0,94 | Древесина | 0,90 |
| Гипс | 0,80...0,90 | Бумага | 0,70...0,94 |
| Известк. раствор | 0,89...0,91 | Окиси хрома | 0,81 |
| Кирпич | 0,93...0,96 | Окиси меди | 0,78 |
| Пена | 0,75...0,80 | Окиси железа | 0,78...0,82 |

Закон смещения Вина:

– для **АЧТ** максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны, обратно пропорциональную температуре

$$r_{\omega} = \omega^3 f\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

$$r_{\lambda} = \frac{1}{\lambda^5} F\left(\frac{1}{\lambda T}\right)$$

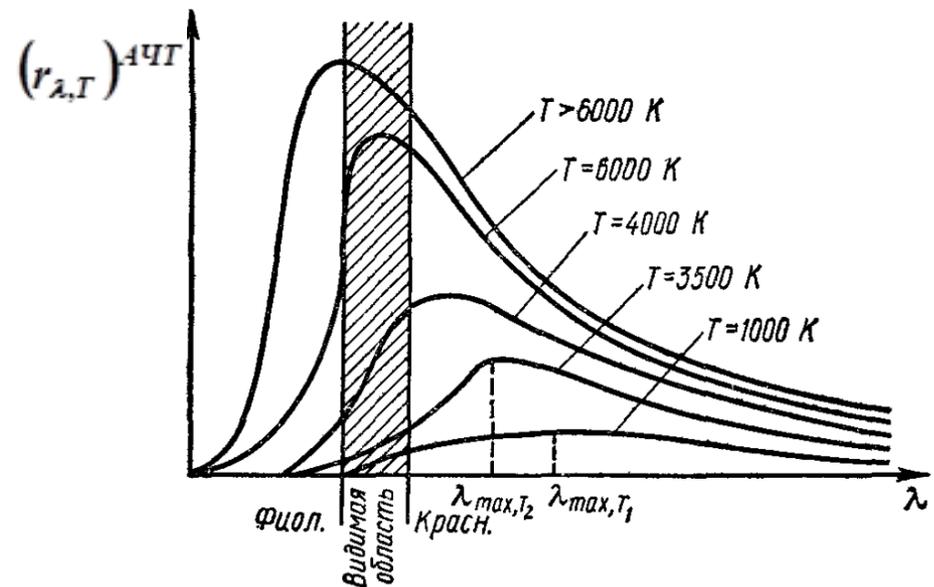
$$r_{max} = CT^5$$

$$C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$$

– максимальная испускательная способность прямо пропорциональна пятой степени абсолютной температуры

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

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{К})$$



При повышении температуры максимум спектральной плотности излучения смещается в область более коротких длин волн

Закон смещения Вина: $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$

| Ц В Е Т | НАИМЕНОВАНИЕ ЦВЕТА | t °C |
|---------|-----------------------|-----------|
| | Ослепительно белый | 1250-1300 |
| | Светложелтый | 1150-1250 |
| | Темножелтый | 1050-1150 |
| | Оранжевый | 900-1050 |
| | Светлокрасный | 830-900 |
| | Светловишнево-красный | 800-830 |
| | Вишнево-красный | 770-800 |
| | Темновишнево-красный | 730-770 |
| | Темнокрасный | 650-730 |
| | Коричнево-красный | 580-650 |
| | Темнокоричневый | 530-580 |

таблица определения температуры по цвету каления

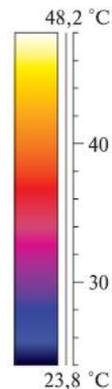
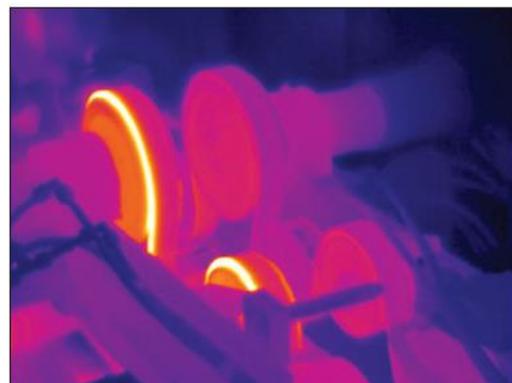
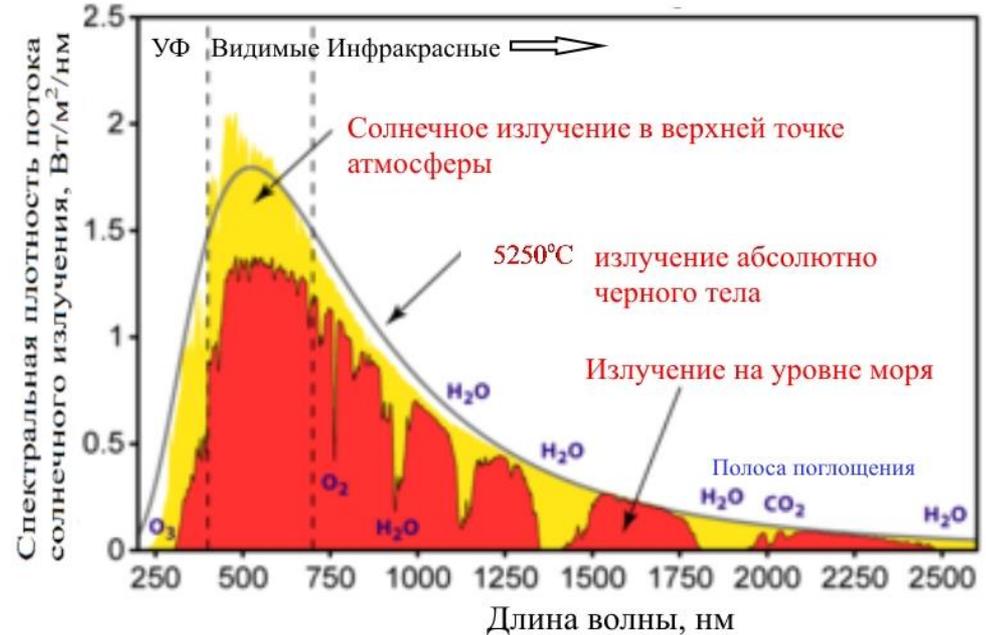


Рис. 25.5. Термограмма двигателя



Рис. 25.4. Тепловизор ThermaCAM P 640

Формула Рэля-Джинса:

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

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

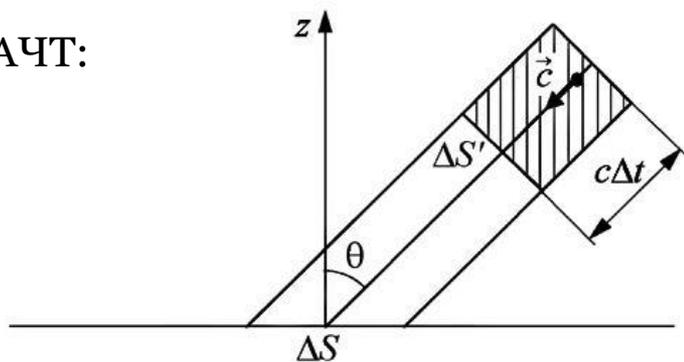


Закон Вина:

$$r_{\omega} = \omega^3 f\left(e^{-\frac{\omega}{T}}\right)$$

$$u(T) = \int_0^{\infty} u_{\omega}(T) d\omega \rightarrow \infty$$

АЧТ:



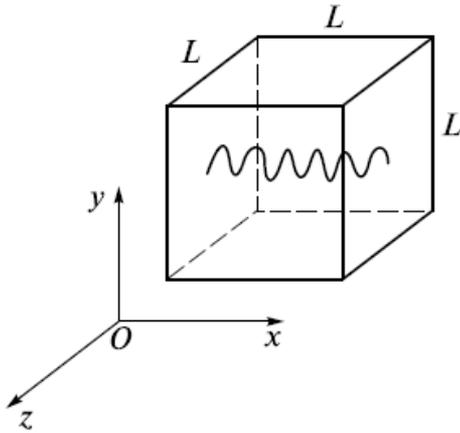
$$\Phi = R\Delta S$$

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\int u(T) \cdot c\Delta t \Delta S \cos\theta \cdot d\Omega / (4\pi)}{\Delta t}$$

$$R(T) = \frac{c}{4} u(T) \quad r_{\omega}(T) = \frac{c}{4} u_{\omega}(T)$$

Гипотеза о квантах:

излучение испускается и поглощается веществом не непрерывно, а конечными порциями энергии (квантами энергии)



$$u(T) = \int_0^{\infty} \frac{dN \cdot \langle \varepsilon \rangle}{V}$$

$$\langle \varepsilon \rangle = kT \rightarrow \langle \varepsilon \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} P_n \varepsilon_n$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$$

$$\varepsilon_n = n\hbar\omega = nh\nu \quad h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Формула Планка:

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

$$u_{\omega}(T) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$$

Предельные случаи:

$$\hbar \omega \ll kT$$

$$\hbar \omega \gg kT$$