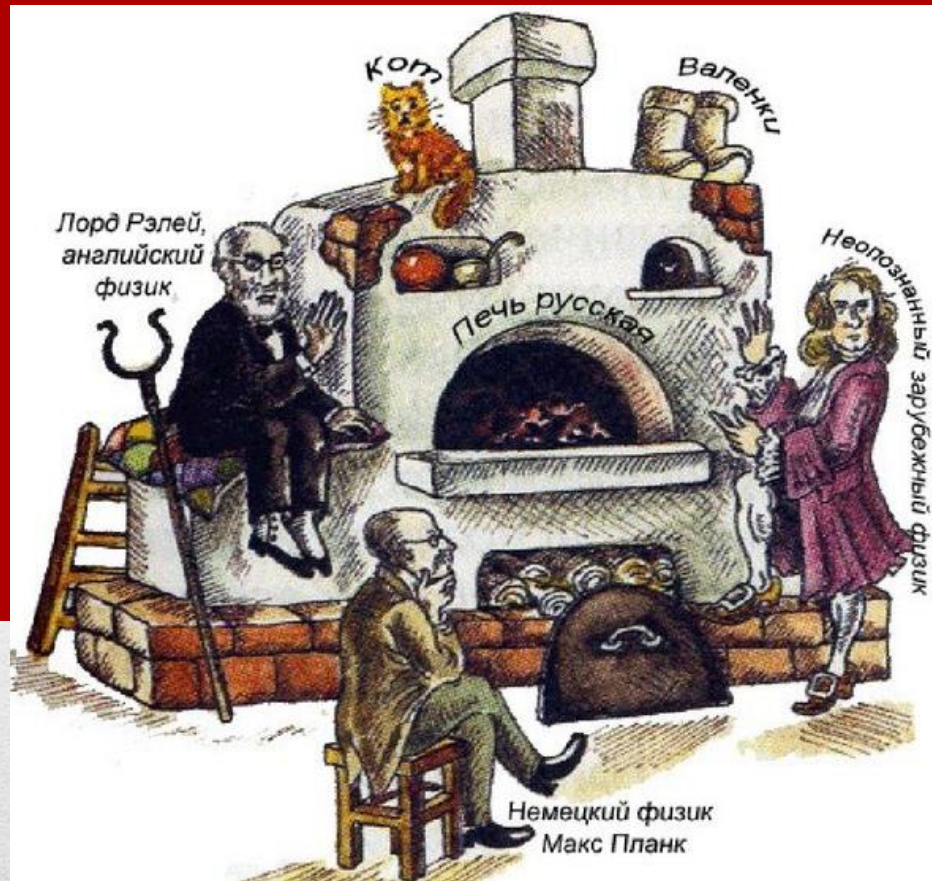




Тепловое излучение

Вильчинская Светлана Сергеевна



План:

1. Тепловое излучение абсолютно черного тела АЧТ
 2. Тепловое излучение реальных тел
 3. Эквивалентные температуры
-

Всякое излучение, источником которого является тепловая энергия излучающего тела, принято называть **тепловым излучением**.

Тело можно заставить длительно светиться, нагревая его. Широкое распространение как источники излучения получили тела, нагреваемые электрическим током, проходящим через них. Ток, проходящий через нить накала электрической лампы, восполняет убыль энергии в результате излучения нитью потока излучения.

Тепловое излучение. Изучение процессов излучения показывает, что различные тела, имеющие одну и ту же температуру, могут обладать различной энергетической светимостью, если они имеют различные коэффициенты поглощения. Все тела делятся на три класса: *черные, серые и избирательные (селективные)*.

Модель абсолютно черного тела (АЧТ)

Под черным телом понимают тело, поглощающее всю падающую на него энергию. Коэффициент поглощения черного тела $\alpha = 1$. Часто коэффициент поглощения называют поглощательной способностью тела. В природе черных тел нет: черный бархат имеет $\alpha = 0,995 \div 0,996$, в то время как мел имеет $\alpha = 0,15 \div 0,22$.

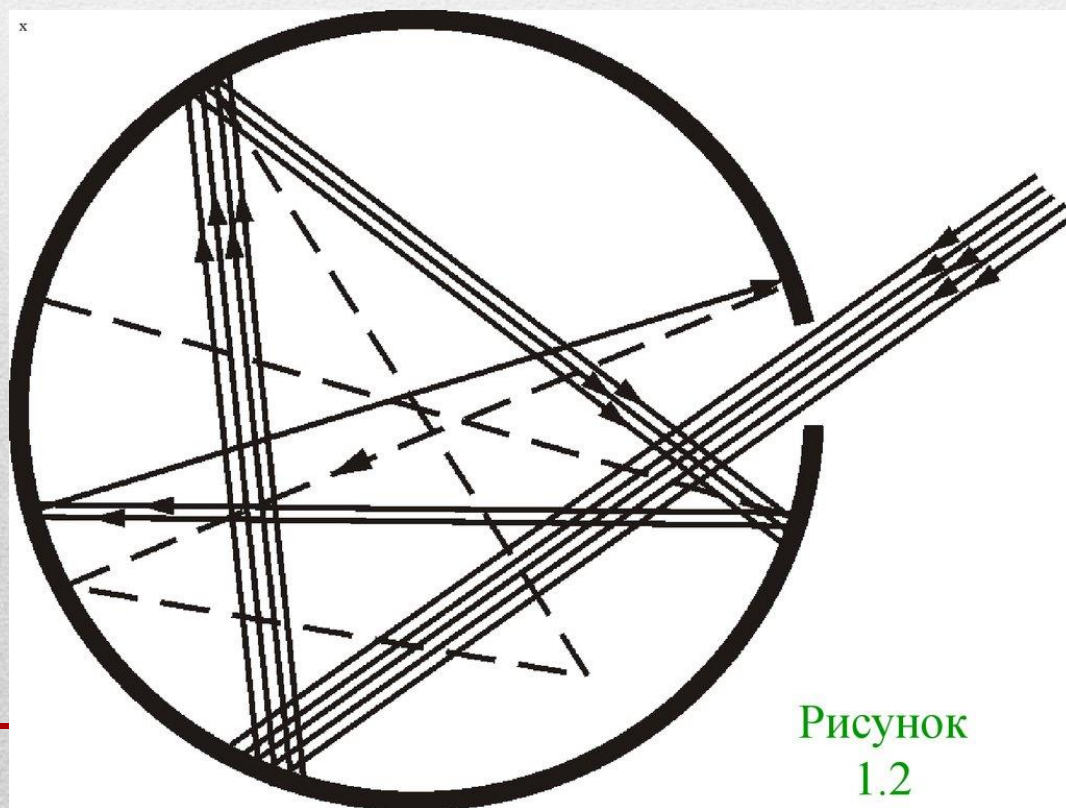
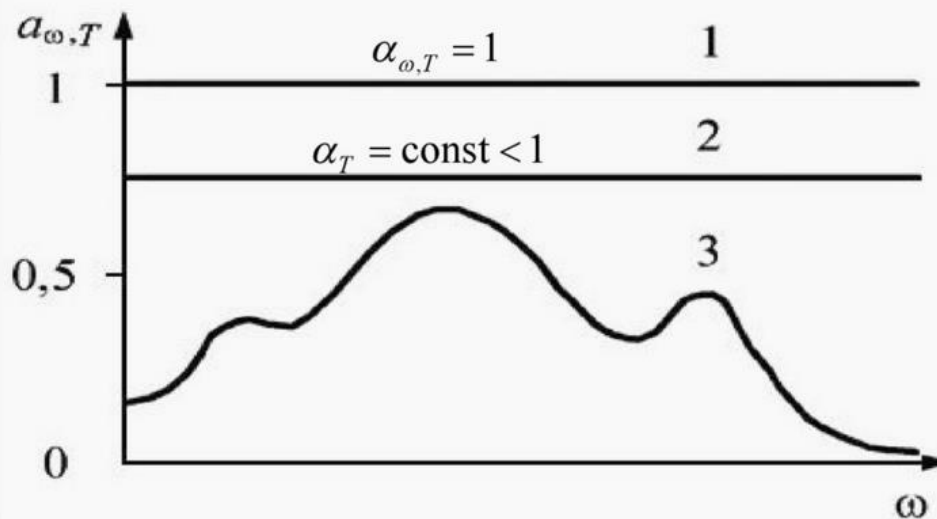


Рисунок
1.2



Спектральная поглощательная способность тела:

1 – абсолютно черное тело; 2 – серое тело;

3 – реальное тело

$$\alpha_{\omega,T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}} \quad \frac{\text{полгл.}}{\text{над.}} \quad \text{поглощательная способность тела.}$$

Для тела, полностью поглощающего излучения всех частот $\alpha_{\omega,T} = 1$

$\alpha_{\omega,T} = 1$ - абсолютно черное тело.

$\alpha_T = \text{const}$ и меньше единицы - серое тело.

Законы излучения АЧТ (абсолютно черного тела)

Закон Кирхгофа

- В 1859 г. Р. Кирхгоф установил связь между энергетическими светимостями M_e и коэффициентами поглощения α двух тел, имеющих **одинаковую температуру**

$$M_{e1T} / M_{e2T} = \alpha_{e1T} / \alpha_{e2T}$$

отношение энергетических светимостей тел с одинаковой температурой равняется отношению коэффициентов поглощения:

Закон Кирхгофа

$$M_{e1T} / M_{e2T} = \alpha_{e1T} / \alpha_{e2T}.$$

Для ряда тел:

$$M_{e1T} / \alpha_{e1T} = M_{e2T} / \alpha_{e2T} = \dots = M_{enT} / \alpha_{enT} = M_{eST},$$

M_{eST} -энергетическая светимость АЧТ

Для монохроматических потоков излучения закон Кирхгофа имеет следующий вид:

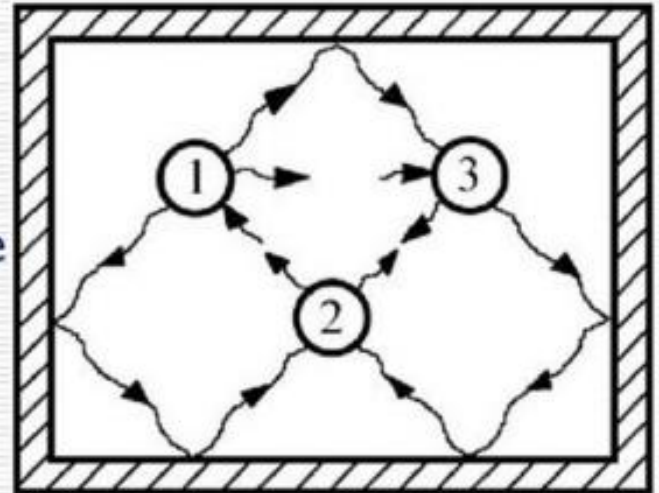
$$\begin{aligned} m_{e1}(\lambda T) / \alpha_1(\lambda T) &= m_{e2}(\lambda T) / \alpha_2(\lambda T) = \dots \\ \dots &= m_{en}(\lambda T) / \alpha_n(\lambda T) = m_{eS}(\lambda T), \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $m_{eS}(\lambda T)$, $m_{e1}(\lambda T)$, $m_{en}(\lambda T)$ — спектральные плотности энергетических светимостей черного тела и различных излучателей для данной длины волны λ и температуры T ;

ЗАКОН КИРХГОФА

Пусть внутри замкнутой эвакуированной оболочки, поддерживаемой при постоянной температуре, помещены несколько тел. Опыт показывает, что такая система через некоторое время придет в состояние теплового равновесия – все тела примут одну и ту же температуру равную температуре оболочки.

Поскольку температура (а следовательно, и энергия) в состоянии теплового равновесия у тел не меняется, то тело, испускающее больше энергии, должно и больше поглощать, то есть излучательная и поглощательная способности тела должны быть связаны между собой.



Кирхгоф установил закон согласно которому, отношение излучательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры

$$\frac{M_e(T)}{\alpha_e(T)} = \frac{M_e(T)_1}{\alpha_e(T)_1} = \frac{M_e(T)_2}{\alpha_e(T)_2} = \dots = \frac{M_e(T)_n}{\alpha_e(T)_n} = M_e^0(T)$$

$$\frac{M_{e\lambda}(\lambda T)_1}{\alpha_e(\lambda T)_1} = \frac{M_{e\lambda}(\lambda T)_2}{\alpha_e(\lambda T)_2} = \dots = \frac{M_{e\lambda}(\lambda T)_n}{\alpha_e(\lambda T)_n} = M_{e\lambda}^0(\lambda T)$$

Из закона Кирхгофа можно сделать следующие выводы:

1. Любое реальное тело излучает с единицы поверхности всегда меньший поток излучения, чем черное тело при той же температуре.

2. Спектральная плотность энергетической светимости реального тела в любой области спектра всегда меньше спектральной энергетической светимости черного тела в той же области спектра при одинаковой температуре реального и черного тел.

3. Кривые $m_e(\lambda T)$ для серого и селективного излучателей всегда лежат внутри кривой $m_{es}(\lambda T)$ для черного тела при равенстве температур этих тел.

Закон смещения Вина

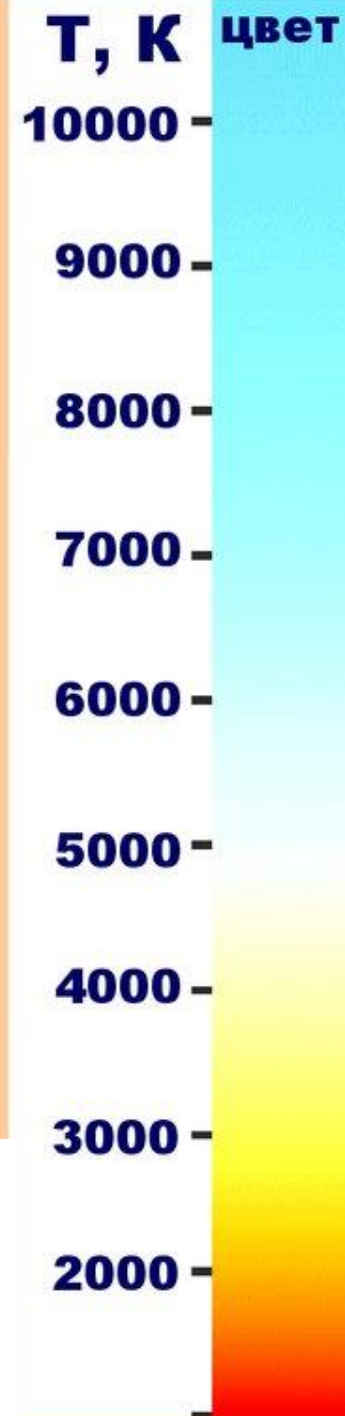
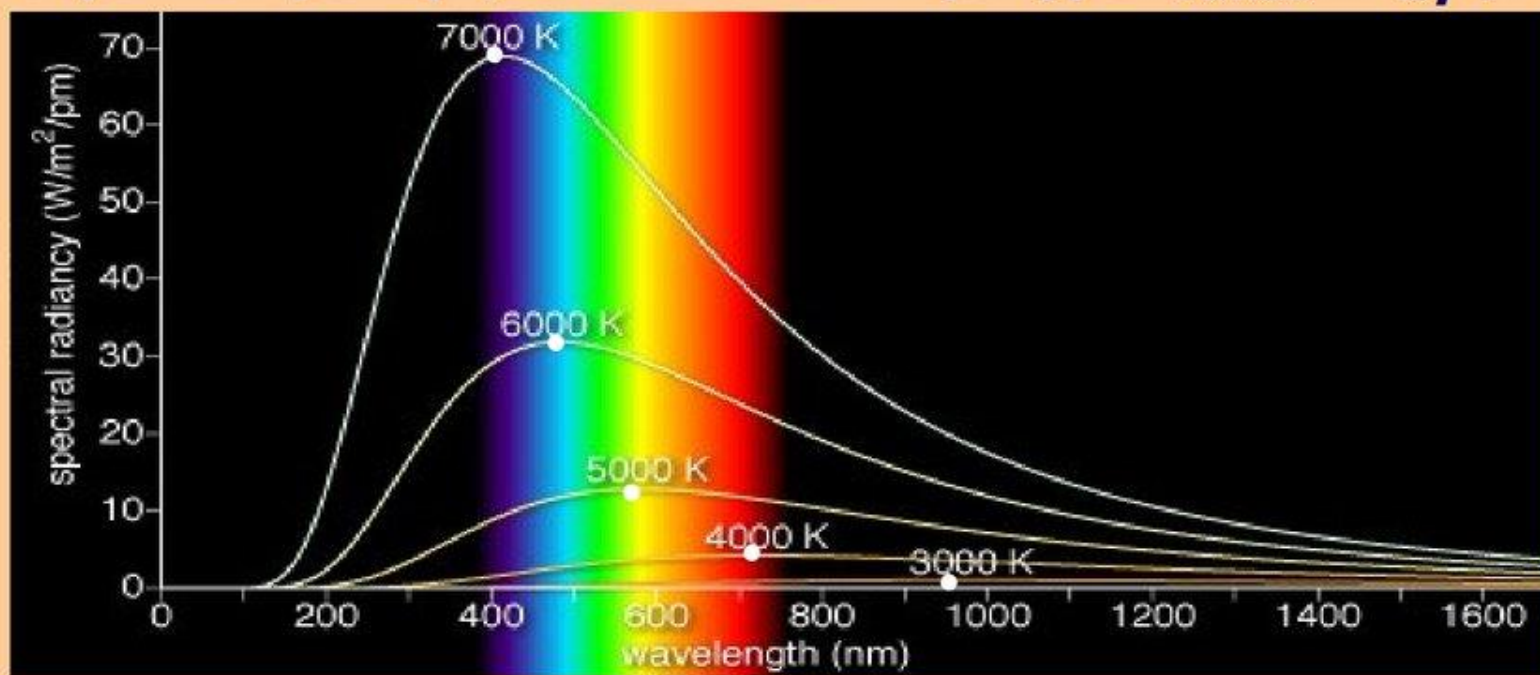
На основании опытных кривых распределения спектральной плотности энергетической светимости по спектру черного тела В. Вин (1864—1928) получил аналитическое выражение, описывающее длину волны λ_{max} , на которую приходится максимум кривой $m_{es}(\lambda T)$ при данной температуре T :

$$\lambda_{max} T = C', \quad (2.4)$$

где $C' = 2896$ мкм·К. Это соотношение называется *законом смещения Вина*.

ЗАКОН ВИНА

Цвет свечения тела определяется его температурой. Зависимость длины волны, соответствующей максимуму спектра (белые точки на рисунке) от температуры тела определяется законом Вина: **длина волны, на которую приходится максимум энергетического светимости, обратно пропорциональна температуре** $\lambda_{\max} = C'/T$



Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} T = 2896 \text{ мкм} \cdot \text{K}.$$



2700K

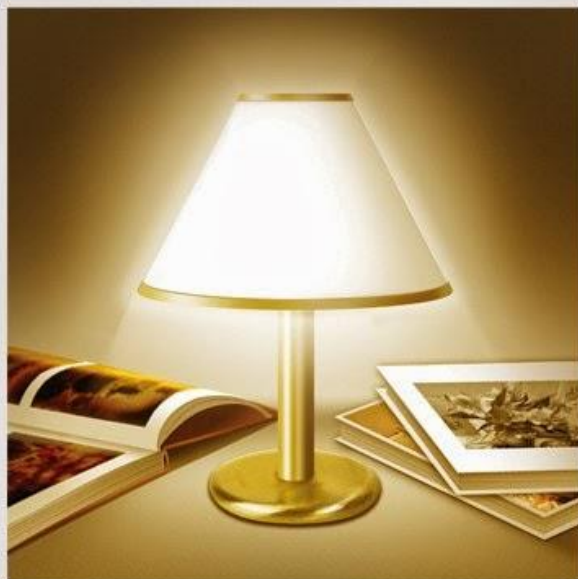
Теплый
белый свет

4200K

Естественный
белый свет

6400K

Холодный
белый свет

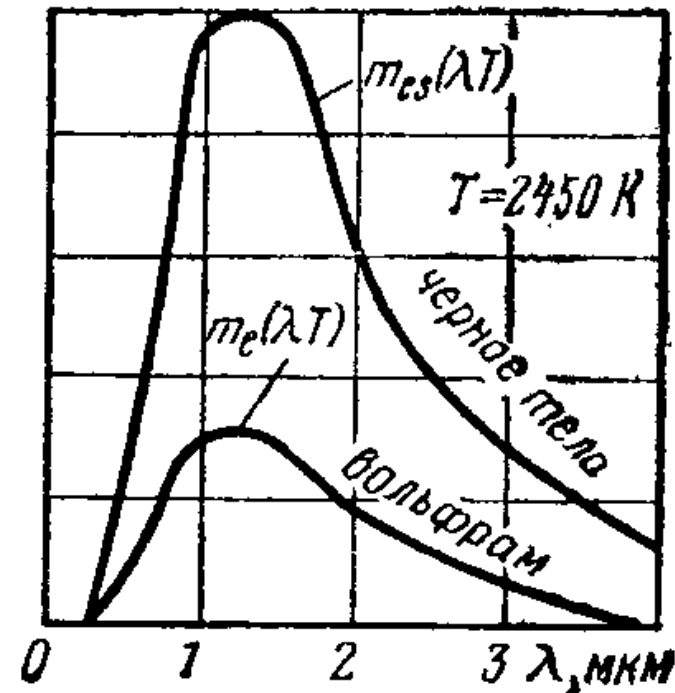


На основании анализа опытных кривых $m_{eS}(\lambda T)$ было установлено уравнение для максимального значения спектральной плотности энергетической светимости $m_{eS}(\lambda T)_{max}$ черного тела при данной температуре его

$$m_{eS}(\lambda T)_{max} = C'' T^5, \quad (2.5)$$

где $C'' = 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-5}$.

Эти законы излучения черного тела выведены путем обобщения экспериментальных данных.



Закон Стефана – Больцмана для АЧТ

$$M_{eST} = \sigma T^4,$$

Полная (по всему спектру) излучательная способность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его температуры

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

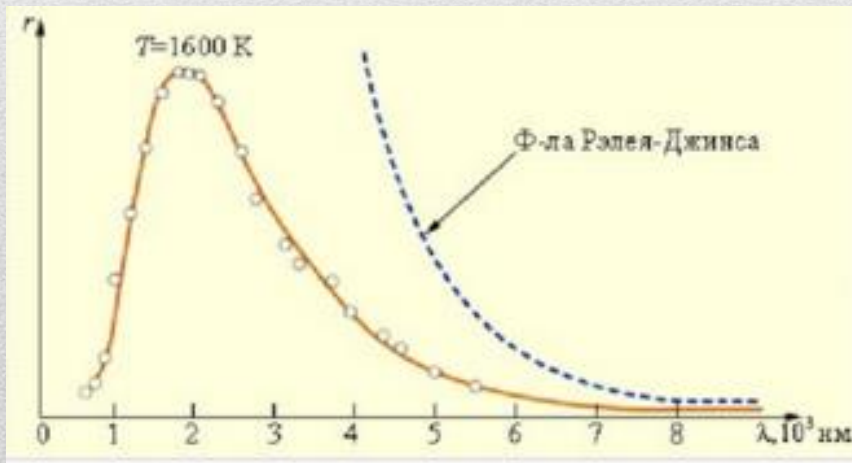
T — температура, К.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ КАТАСТРОФА

- Далее ученые пытались получить аналитическое выражение, чтобы описать спектральную плотность энергетической светимости АЧТ

Закон Релея — Джинса

Уравнение достаточно хорошо согласуется с экспериментом для ИК области спектра



$$m_{eS}(\lambda T) = \frac{C_1}{C_2} \lambda^{-4} T,$$

$$C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$$

$$C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Этот результат получил название ультрафиолетовой катастрофы.

Уравнение Вина (1896 г.) достаточно хорошо согласуется с экспериментом для **УФ и видимого спектра**

$$m_{eS}(\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right),$$



Закон Планка

Только в 1900 г. М. Планку удалось вывести зависимость, удовлетворяющую опытным данным для всего диапазона спектра:

Зависимость спектральной плотности энергетической светимости черного тела от длины волны и температуры, определяемая

$$m_{eS}(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}$$

носит название закон Планка

Анализ полученного Планком уравнения (1-103) потребовал принципиально нового представления об элементарных излучателях как о вибраторах [12], излучающих в пространство энергию дискретными порциями, названными им квантами энергии излучения ($Q_{\text{эф}}$). Это предположение, совмещенное с рассмотрением излучения как потока электромагнитных волн, позволило Планку определить величину кванта излучения и значения постоянных c_1 и c_2 :

$$Q_{\text{эф}} = h\nu; \quad c_1 = 2\pi hc^2; \quad c_2 = \frac{hc}{k},$$

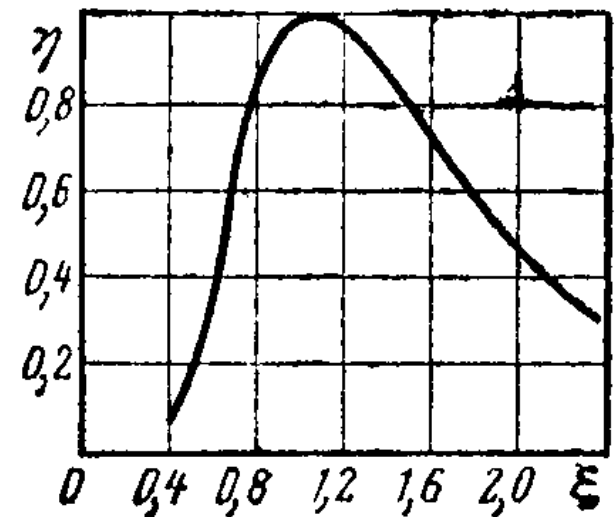
где $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; $c \approx 2,998 \cdot 10^8$ м·с⁻¹ — скорость света в безвоздушном пространстве; $k \approx 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ — постоянная Больцмана; $c_1 \approx 3,742 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²; $c_2 \approx 1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Функция Планка в относительных координатах

$$\eta = 142,3\xi^{-5} / (e^{4,963/\xi} - 1),$$

$$\eta = \frac{m_{eS}(\lambda T)}{m_{eS}(\lambda T)_{\max}}$$

$$\xi = \lambda / \lambda_{\max}$$



Кривая Планка в относительных координатах

от относительных координат ξ . При помощи такой таблицы и аналитических выражений, позволяющих для известной температуры T определить значения ξ и η , можно достаточно легко определить значения $m_{eS}(\lambda T)$ для заданной длины волны и температуры.

Проведенный анализ уравнения Планка позволяет сделать следующие существенные для практики выводы:

1. При повышении температуры излучающего тела происходит интенсивный (пропорционально четвертой степени температуры) рост потока излучения.

2. Максимум функции плотности излучения по спектру растет также пропорционально четвертой степени температуры излучателя.

3. Повышение температуры излучателя приводит к смещению максимума кривой спектральной плотности излучения в область коротких длин волн, следовательно, к увеличению роли излучений в коротковолновой части спектра.

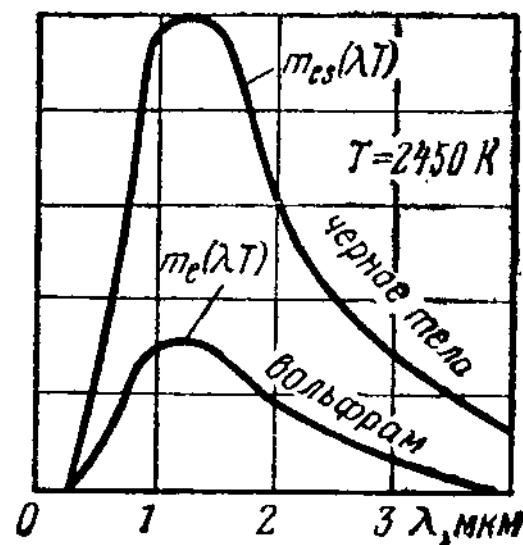
4. Максимум спектральной плотности излучения черного тела лежит в видимой области спектра ($\lambda = 0,38 \div 0,78$ мкм) для значений температуры излучателя в пределах от $T = 4760$ К до $T = 10\,000$ К.

Тепловое излучение реальных тел

Энергетическая светимость реальных тел при данной температуре определяется через энергетическую светимость черного тела при той же температуре, умноженную на интегральный коэффициент теплового излучения:

$$M_{eT} = \varepsilon_T M_{eST} = \varepsilon_T \sigma T^4,$$

где ε_T — интегральный коэффициент теплового излучения, который зависит от температуры и материала излучателя.



Эквивалентные температуры

введены для сравнения хорошо изученных характеристик АЧТ с аналогичными характеристиками реальных тел

1. Радиационная (энергетическая) температура T_p
 2. Яркостная температура T_y
 3. Цветовая температура T_c
-

Радиационная (энергетическая) температура (T_p)

это температура черного тела, при которой энергетическая светимость излучения его равна энергетической светимости интересующего нас тела при его истинной температуре T .

$$M_{eSTp} = M_{eT}$$

$$\sigma T_p^4 = \varepsilon_T \sigma T^4,$$

$$T = T_p / \sqrt[4]{\varepsilon_T}.$$

$$T > T_p.$$

Измерение радиационной (энергетической) температуры производится с помощью *радиационного пирометра*

Яркостная температура $T_{\text{я}}$

2. Яркостная температура ($T_{\text{я}}$) — это температура черного тела, при которой его яркость в узкой области спектра равна яркости в той же области спектра исследуемого тела при температуре T .

$$T = \frac{C_2}{\lambda} \frac{1}{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}} + \ln \varepsilon(\lambda T)}$$

Цветовая температура $T_{\text{ц}}$

3. Цветовая температура ($T_{\text{ц}}$) — температура черного тела, при которой цветность его излучения одинакова с цветностью излучения исследуемого тела при его температуре T .

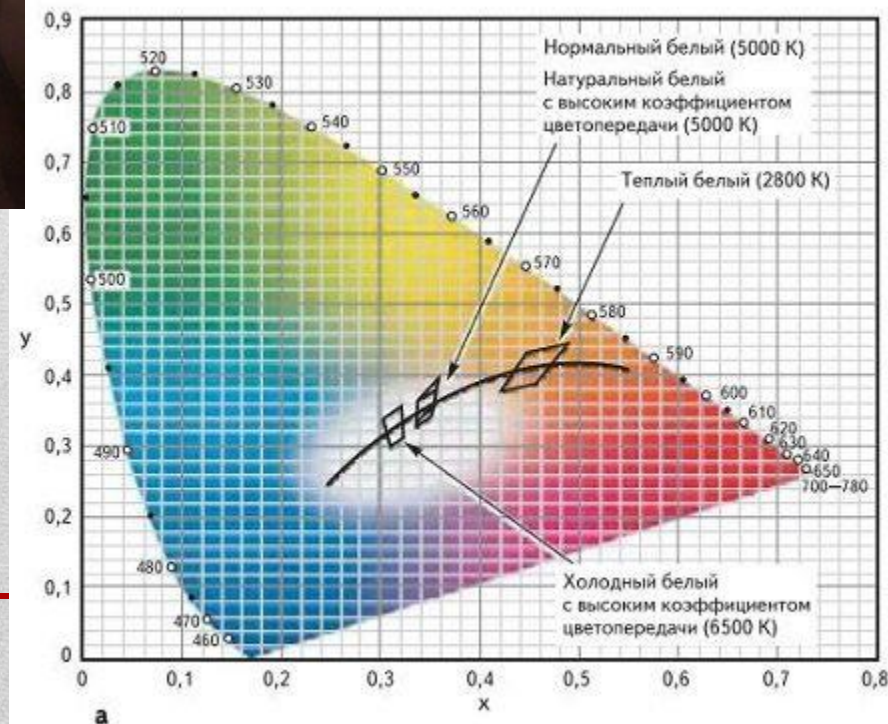
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} - \frac{\ln [\varepsilon(\lambda_1 T) / \varepsilon(\lambda_2 T)]}{C_2 (1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}$$

Цветовая температура ощущается человеком, как объективное впечатление, получаемое от того или иного источника света. За основу взято АЧТ, испускающее излучение с такой же хроматичностью, как и конкретное излучение. При повышении T черного тела, в цветовом спектре будет возрастет синяя составляющая, а красная, наоборот, будет идти на убыль.



При различных цветовых температурах световой поток ламп приобретает всевозможные оттенки. Это следует учитывать при использовании ламп для каких-либо конкретных условий.

В настоящее время существуют такие лампы, в которых цветовая температура максимально приближена к солнечному свету.



ВЫВОДЫ:

- Все материалы при температуре выше абсолютного нуля излучают электромагнитное излучение (за счет теплового движения атомов), оно имеет непрерывный спектр,
 - Максимальные значения излучения смещаются с увеличением температуры в диапазон коротких волн (закон смещения Вина).
 - Спектральная излучательная способность материала являющимся функцией длины волны и температуры.
 - Коэффициент теплового излучения реального материала - отношение светимости материала к светимости абсолютно черного тела. Коэффициент теплового излучения вольфрама, который используется для изготовления нити накала в галогенных лампах, имеет то преимущество, что его максимальное излучение находится в видимом спектре.
-

- Излучение абсолютно черного тела (Планка) Тепловое излучение материала, поглощающего все падающие на него излучения, зависит исключительно от его температуры. Идеальным является так называемое абсолютно черное тело.
 - Среди всех тепловых излучателей оно имеют наивысшую излучательную способность. Его коэффициент поглощения равен 1 (независимо от температуры и длины волны). Так как в природе не существует абсолютно черных материалов, подобные создаются в специальных исследовательских лабораториях.
 - Излучение абсолютно черного тела определяется законом Планка. Он показывает, как с ростом температуры все большая часть излучения приходится на видимый и инфракрасный диапазон.
-