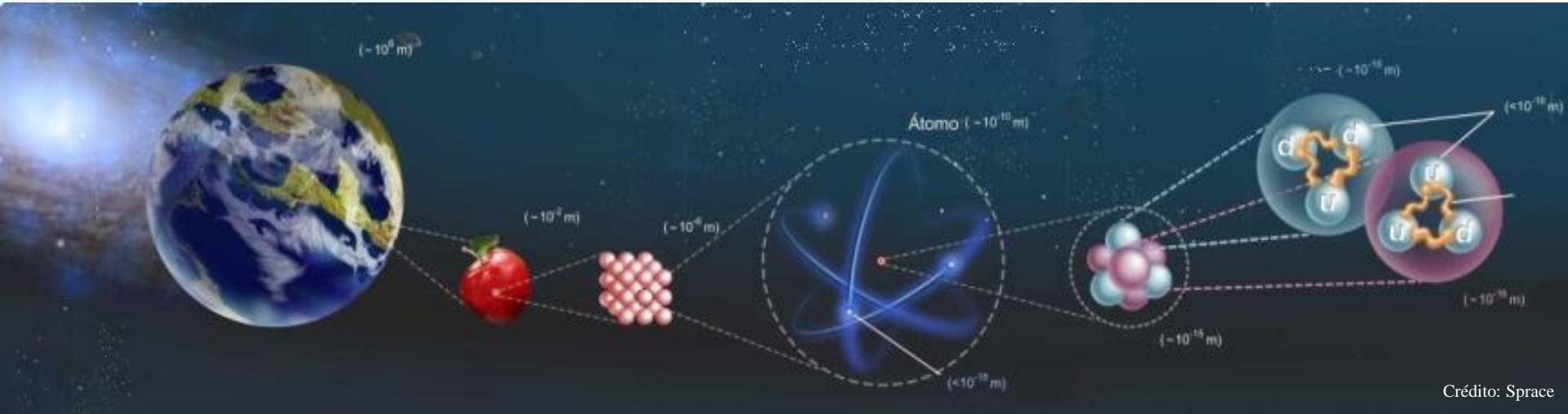




Universidade Federal do ABC

BCK0103: FÍSICA QUÂNTICA

1º Quadrimestre de 2024



Prof. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira
CCNH – UFABC
leigui@ufabc.edu.br

Radiação de corpo negro



Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.

Radiação de corpo negro



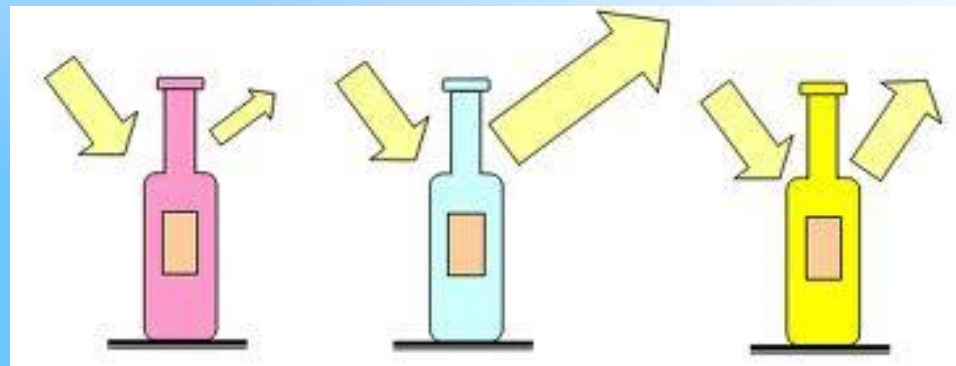
Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Radiação de corpo negro



Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



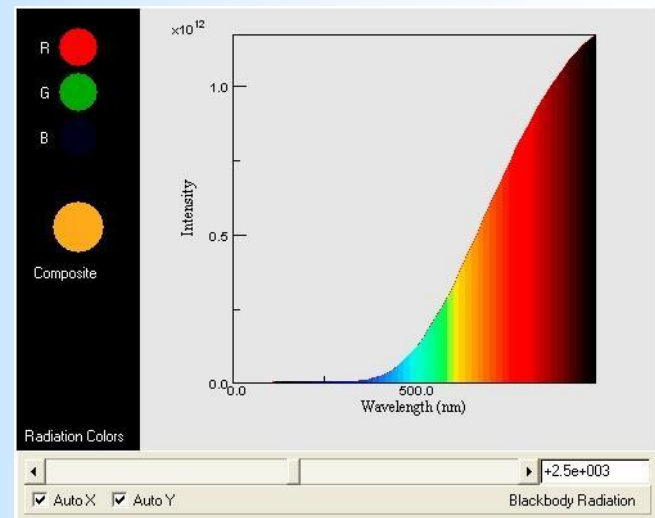
1860 Gustav R. Kirchhoff formula que:
No equilíbrio térmico (à temperatura T):

$$\delta\epsilon_{\lambda}^{abs} = \delta\epsilon_{\lambda}^{emit}$$

Radiação de corpo negro



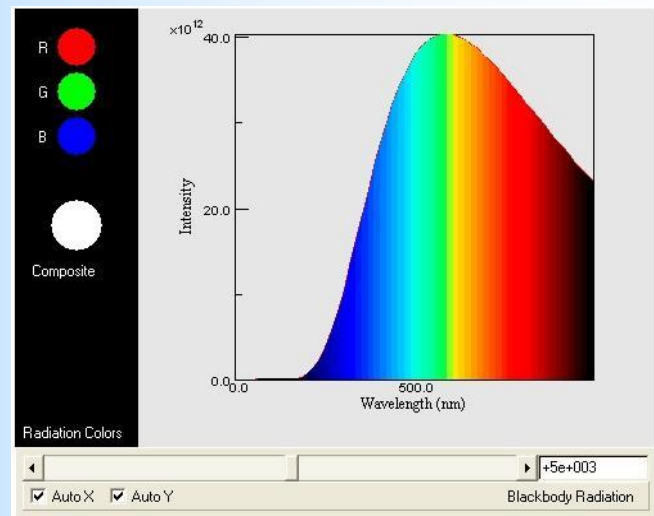
Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Radiação de corpo negro



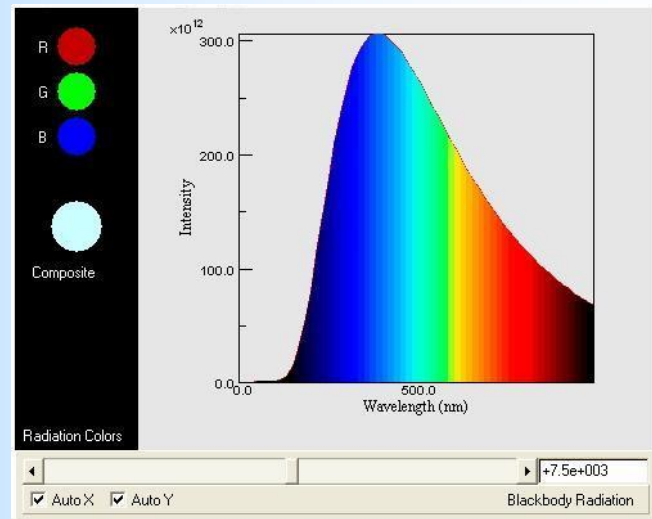
Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Radiação de corpo negro



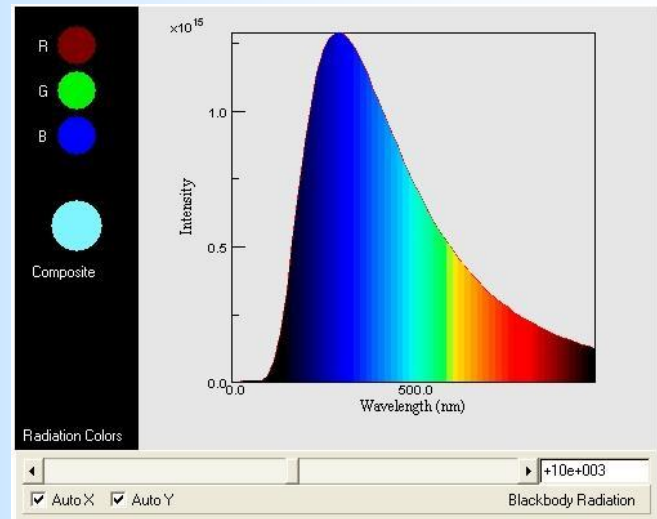
Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Radiação de corpo negro



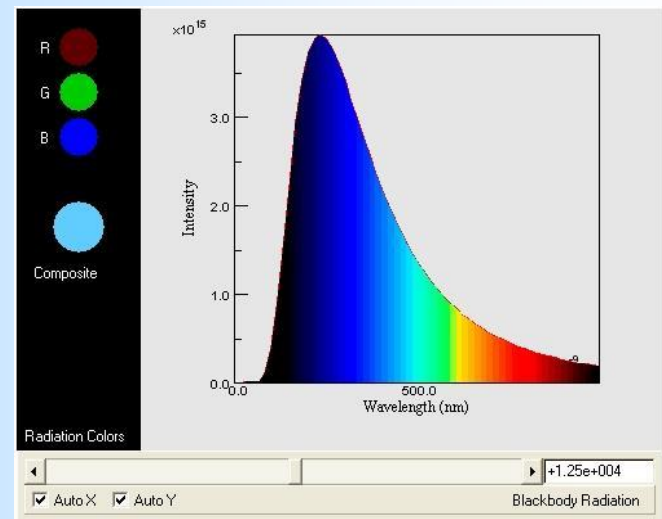
Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Radiação de corpo negro



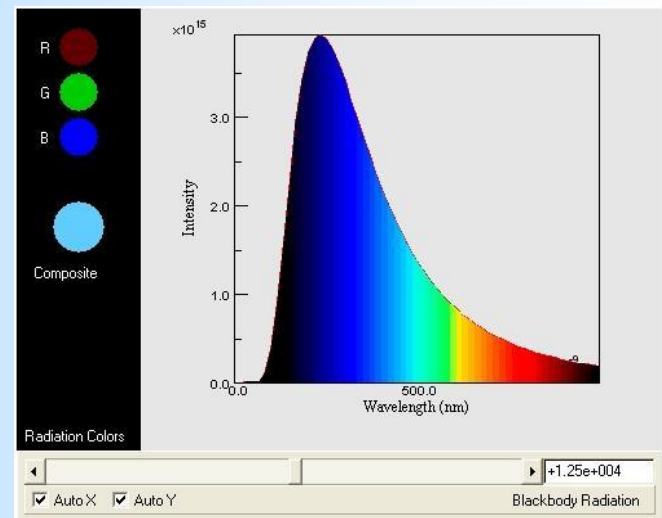
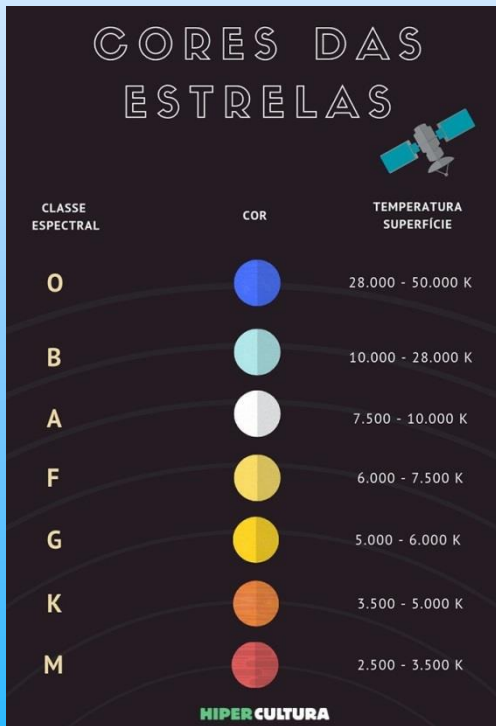
Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Radiação de corpo negro



Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



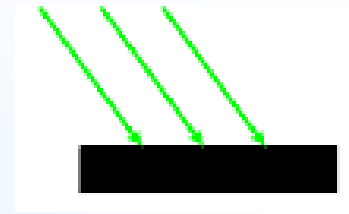
Radiação de corpo negro

Corpo negro (ideal):

Radiação de corpo negro

Corpo negro (ideal):

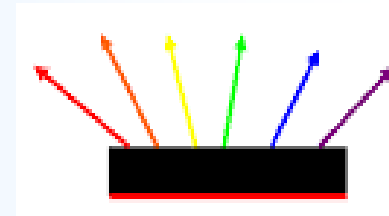
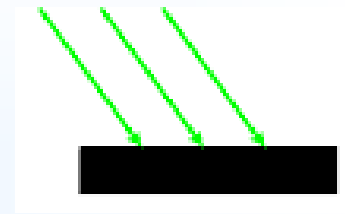
- absorve toda a radiação incidente (sem refletir):



Radiação de corpo negro

Corpo negro (ideal):

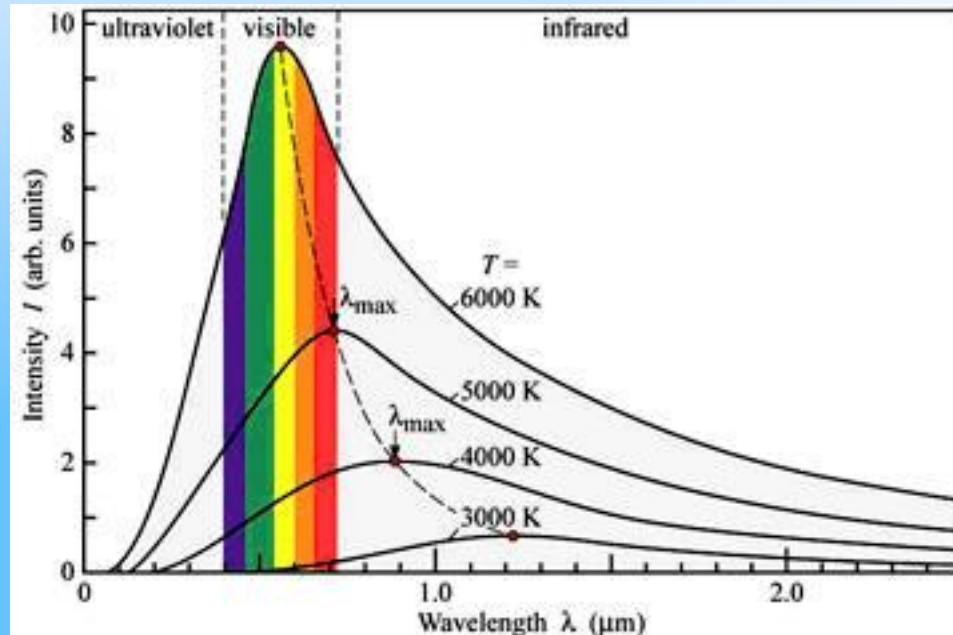
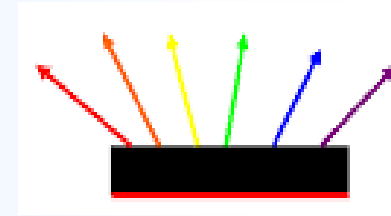
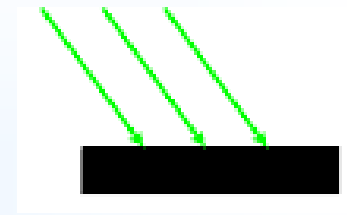
- absorve toda a radiação incidente (sem refletir):
- quando aquecido emite radiação somente como resultado das vibrações térmicas de seus átomos:



Radiação de corpo negro

Corpo negro (ideal):

- absorve toda a radiação incidente (sem refletir):
- quando aquecido emite radiação somente como resultado das vibrações térmicas de seus átomos:



Espectro de corpo negro: **contínuo**.

Radiação de corpo negro

Radiação de corpo negro

1879 Stefan descobre experimentalmente:



Joseph Stefan (1835-1893)

Radiação de corpo negro



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1879 Stefan descobre experimentalmente:

1884 Boltzmann deduz teoricamente:



Joseph Stefan (1835-1893)

Radiação de corpo negro



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1879 Stefan descobre experimentalmente:

1884 Boltzmann deduz teoricamente:



Joseph Stefan (1835-1893)

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4$$

Radiação de corpo negro



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1879 Stefan descobre experimentalmente:

1884 Boltzmann deduz teoricamente:



Joseph Stefan (1835-1893)

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

Radiação de corpo negro



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1879 Stefan descobre experimentalmente:

1884 Boltzmann deduz teoricamente:



Joseph Stefan (1835-1893)

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

A taxa de emissão de radiação por unidade de área (potência por unidade de área) de objetos aquecidos é proporcional à quarta potência da temperatura.

Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

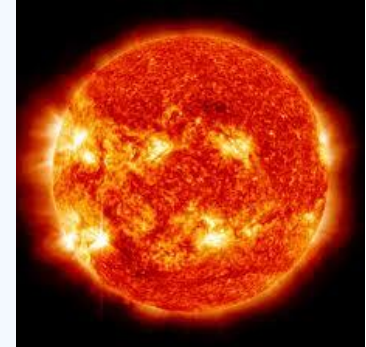
Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$R = \sigma T^4$, onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan–Boltzmann

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$R_S = \sigma T_S^4$$



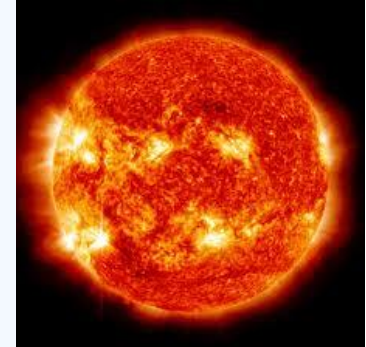
Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$R = \sigma T^4$, onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan–Boltzmann

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$R_S = \sigma T_S^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 5800^4$$



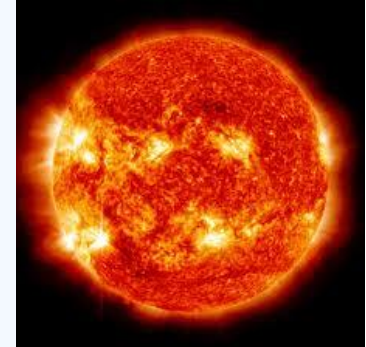
Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$R = \sigma T^4$, onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan–Boltzmann

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$R_S = \sigma T_S^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 5800^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$



Radiação de corpo negro

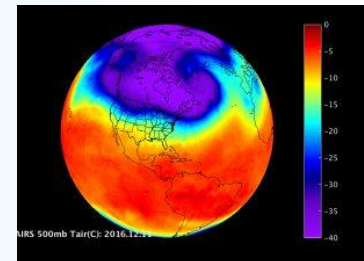
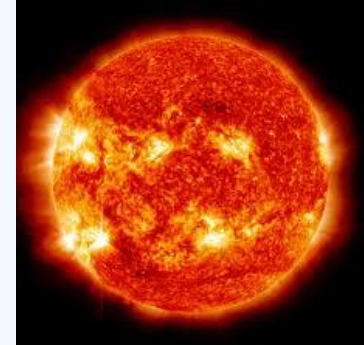
Lei de Stefan-Boltzmann:

$R = \sigma T^4$, onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan–Boltzmann

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$R_S = \sigma T_S^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 5800^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$R_T = \sigma T_T^4$$



Radiação de corpo negro

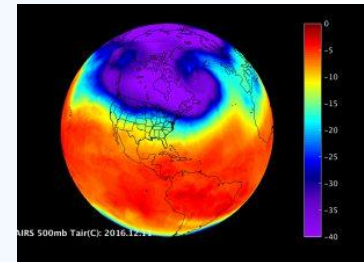
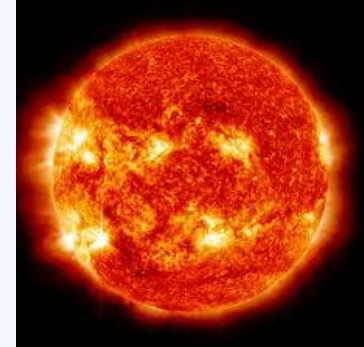
Lei de Stefan-Boltzmann:

$R = \sigma T^4$, onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan–Boltzmann

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$R_S = \sigma T_S^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 5800^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$R_T = \sigma T_T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 300^4$$



Radiação de corpo negro

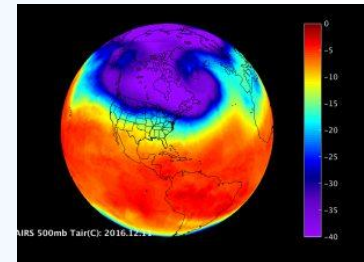
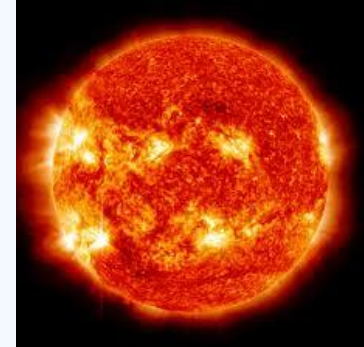
Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$R_S = \sigma T_S^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 5800^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$R_T = \sigma T_T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 300^4 = 459 \text{ W/m}^2$$



Radiação de corpo negro

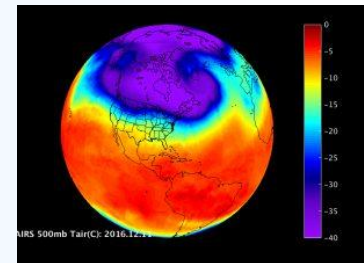
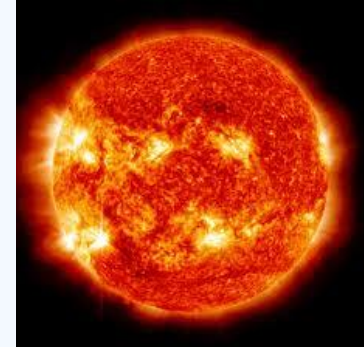
Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$R_S = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$R_T = 459 \text{ W/m}^2$$



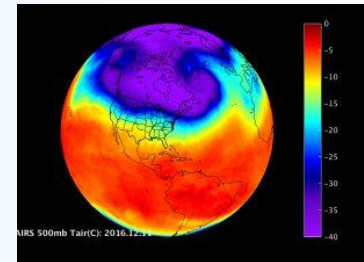
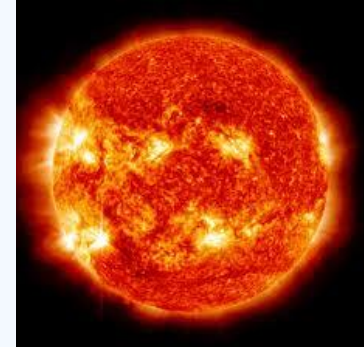
Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$\left. \begin{array}{l} R_S = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \\ \\ R_T = 459 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} \frac{R_S}{R_T}$$



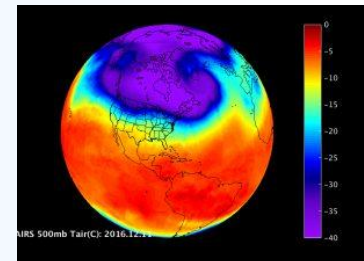
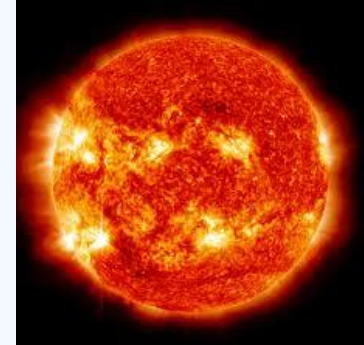
Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$\left. \begin{array}{l} R_S = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \\ \\ R_T = 459 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} \frac{R_S}{R_T} = \frac{6,4 \cdot 10^7}{459}$$



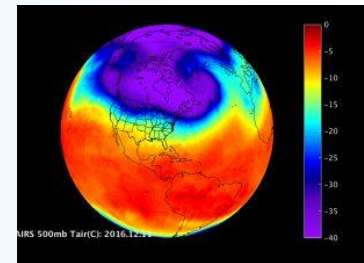
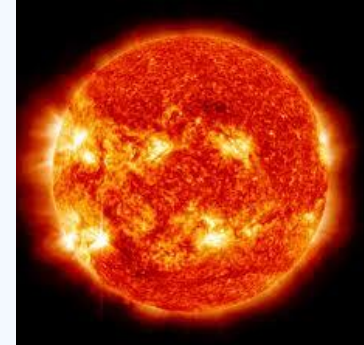
Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$\left. \begin{array}{l} R_S = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \\ \\ R_T = 459 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} \frac{R_S}{R_T} = \frac{6,4 \cdot 10^7}{459} = 1,4 \cdot 10^5$$



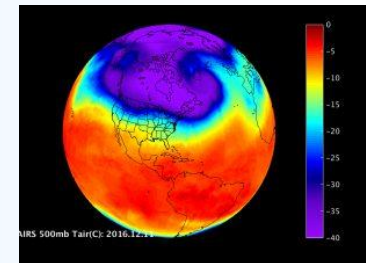
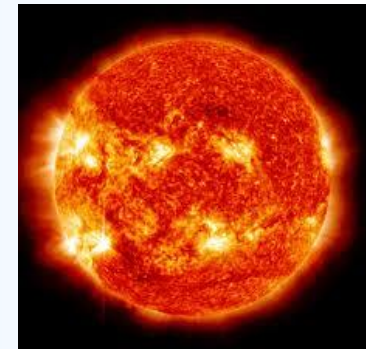
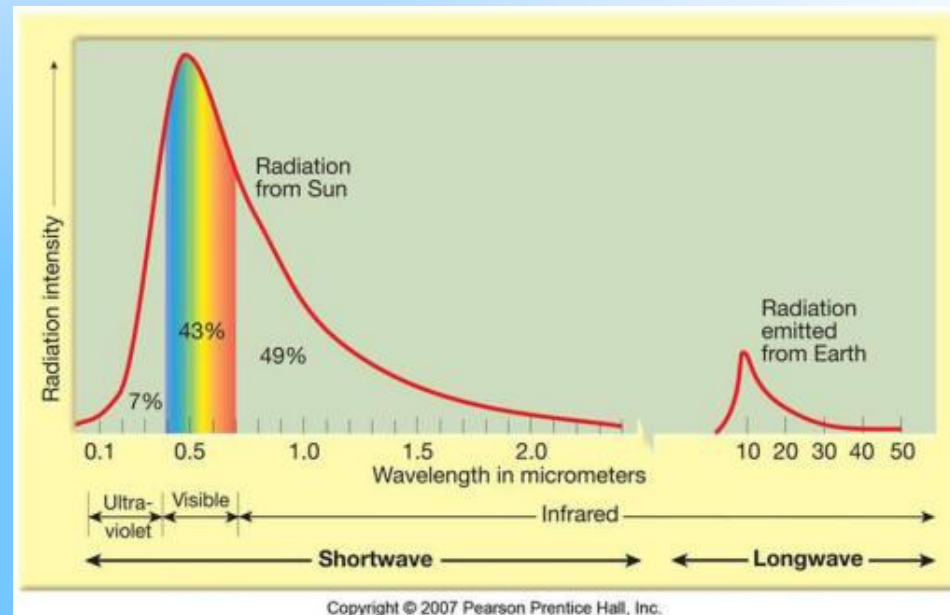
Radiação de corpo negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$R = \sigma T^4$, onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan–Boltzmann

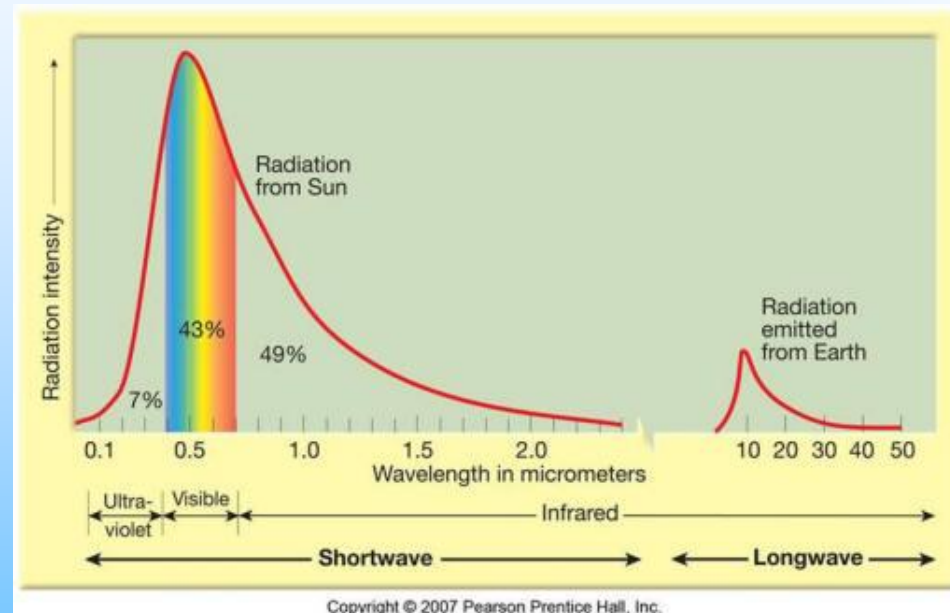
Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$\frac{R_S}{R_T} = 1,4 \cdot 10^5$$



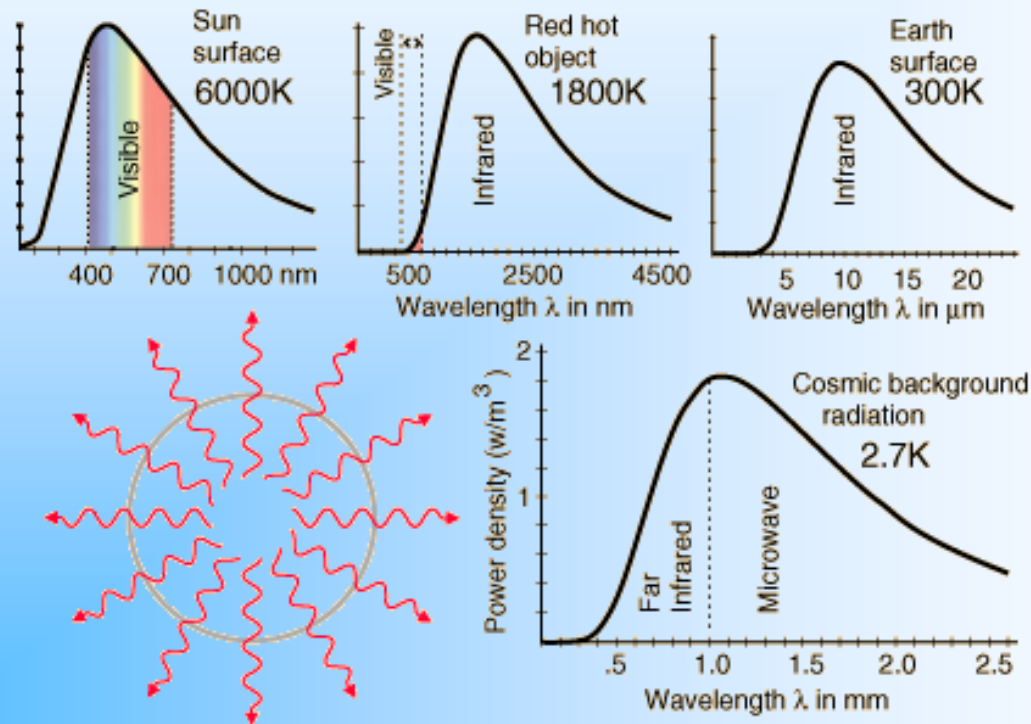
Radiação de corpo negro

Note agora os comprimentos de onda da máxima emissão (λ^{\max}):



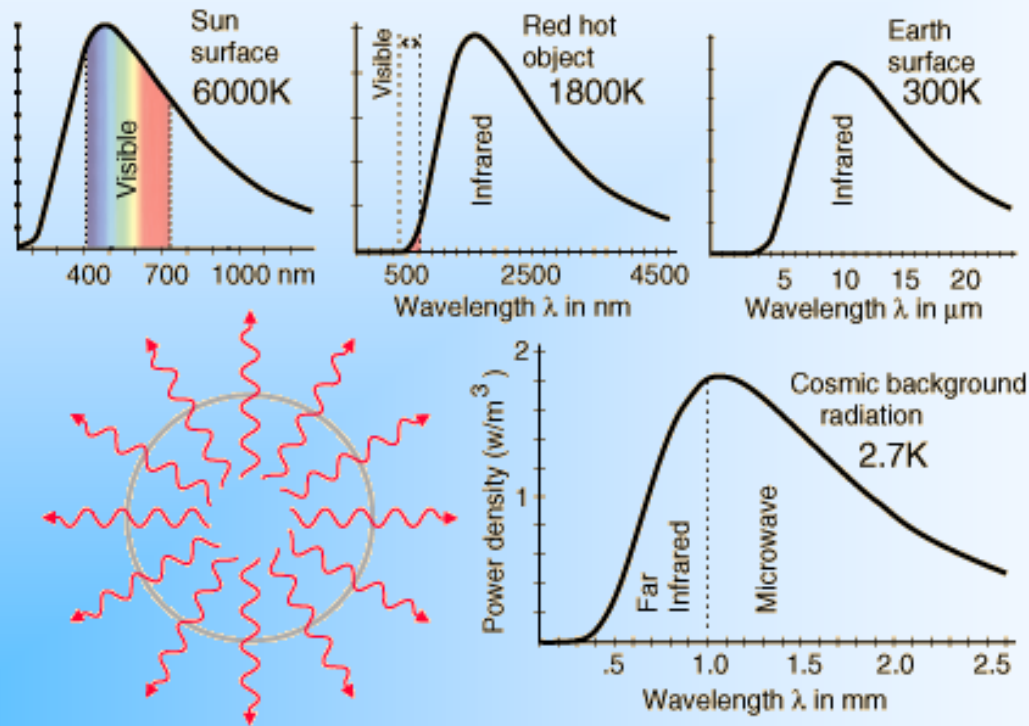
Radiação de corpo negro

Note agora os comprimentos de onda da máxima emissão (λ^{\max}):



Radiação de corpo negro

Note agora os comprimentos de onda da máxima emissão (λ^{\max}):



Observamos que: $\lambda^{\max} \propto \frac{1}{T}$

Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)

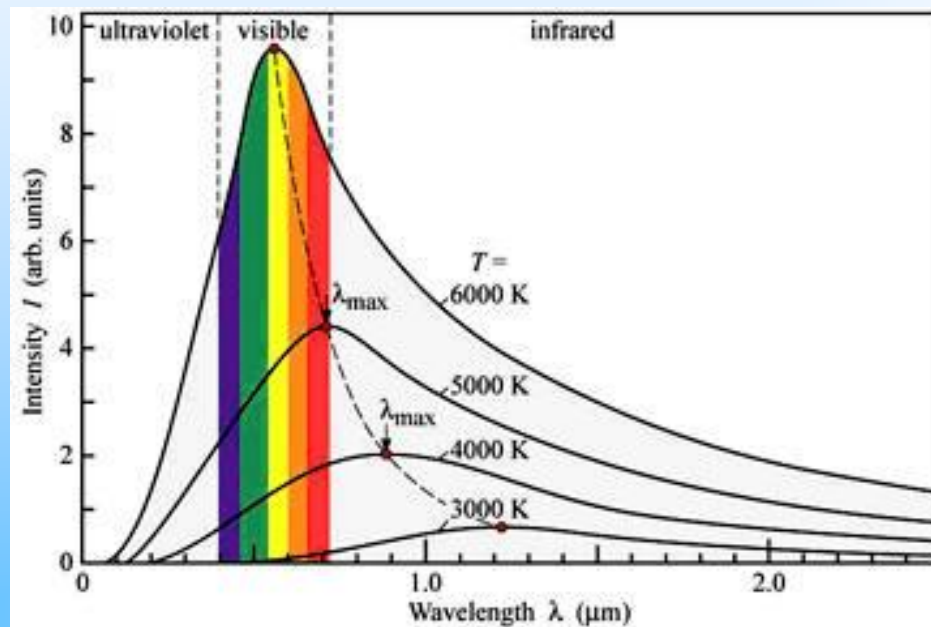
Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)



$$T_1 > T_2 > T_3 \Rightarrow \lambda_1^{\max} < \lambda_2^{\max} < \lambda_3^{\max}$$

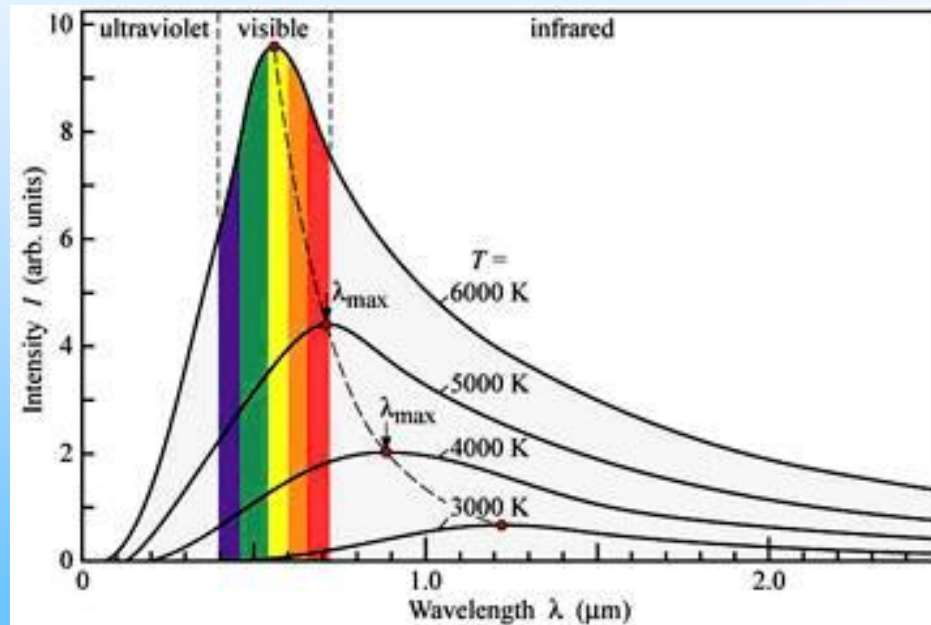
Radiação de corpo negro



Wilhelm Wien
(1864-1928)

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



$$T_1 > T_2 > T_3 \Rightarrow \lambda_1^{\max} < \lambda_2^{\max} < \lambda_3^{\max}$$

branco - azulado ← amarelo ← laranja ← vermelho ← infravermelho

Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

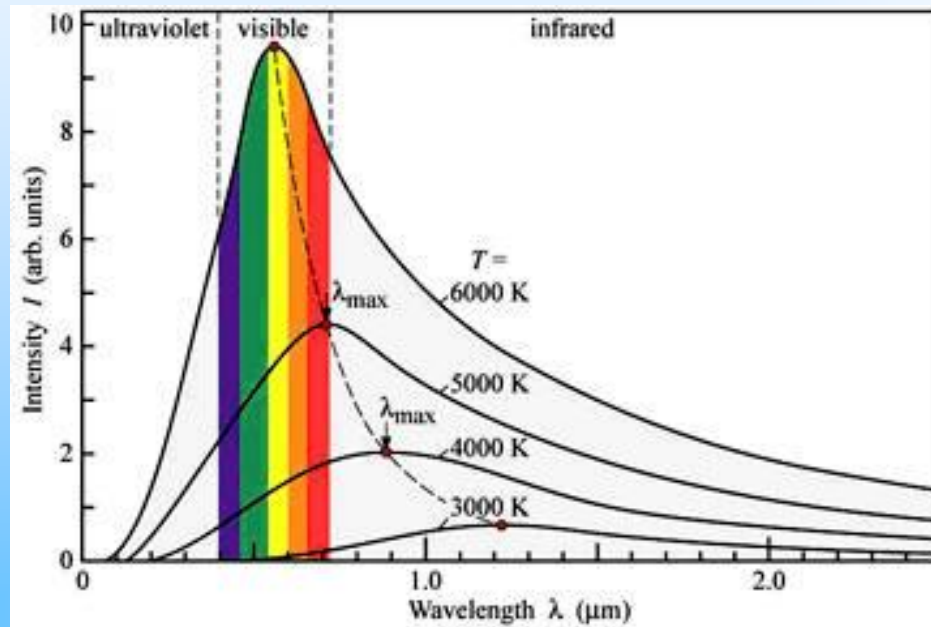
$$\lambda_{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)



1911



$$T_1 > T_2 > T_3 \Rightarrow \lambda_1^{\max} < \lambda_2^{\max} < \lambda_3^{\max}$$

branco - azulado ← amarelo ← laranja ← vermelho ← infravermelho

Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$

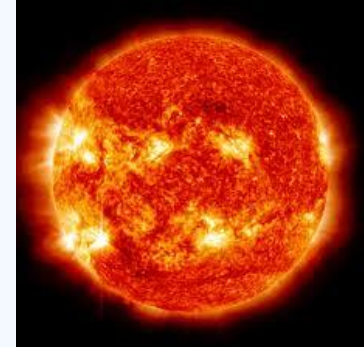


Wilhelm Wien
(1864-1928)



1911

Exemplo: A intensidade máxima de radiação solar ocorre em $\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$, qual é a temperatura da superfície solar?



Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



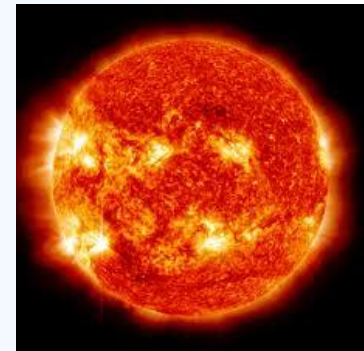
Wilhelm Wien
(1864-1928)



1911

Exemplo: A intensidade máxima de radiação solar ocorre em $\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$, qual é a temperatura da superfície solar?

$$\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$$



Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



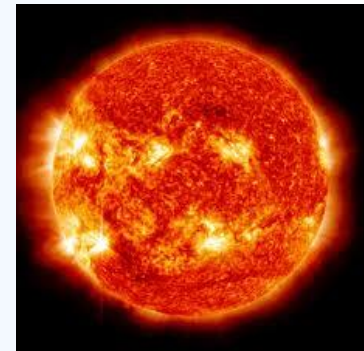
Wilhelm Wien
(1864-1928)



1911

Exemplo: A intensidade máxima de radiação solar ocorre em $\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$, qual é a temperatura da superfície solar?

$$\lambda^{\max} = 490 \text{ nm} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$



Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)

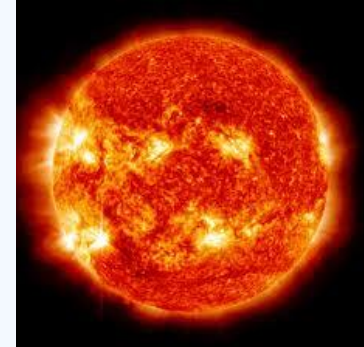


1911

Exemplo: A intensidade máxima de radiação solar ocorre em $\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$, qual é a temperatura da superfície solar?

$$\lambda^{\max} = 490 \text{ nm} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898}{T}$$



Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)

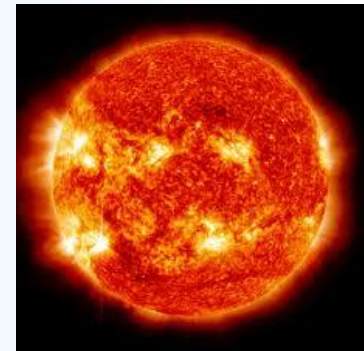


1911

Exemplo: A intensidade máxima de radiação solar ocorre em $\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$, qual é a temperatura da superfície solar?

$$\lambda^{\max} = 490 \text{ nm} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898}{T} \Rightarrow T = \frac{0,002898}{\lambda^{\max}}$$



Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)

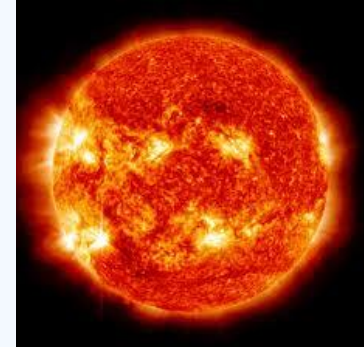


1911

Exemplo: A intensidade máxima de radiação solar ocorre em $\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$, qual é a temperatura da superfície solar?

$$\lambda^{\max} = 490 \text{ nm} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898}{T} \Rightarrow T = \frac{0,002898}{\lambda^{\max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{4,9 \cdot 10^{-7}}$$



Radiação de corpo negro

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)

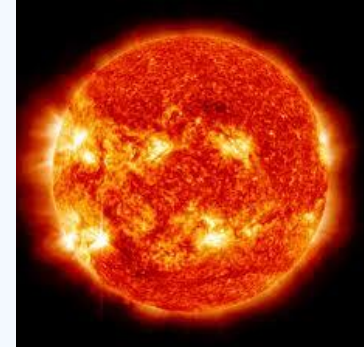


1911

Exemplo: A intensidade máxima de radiação solar ocorre em $\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$, qual é a temperatura da superfície solar?

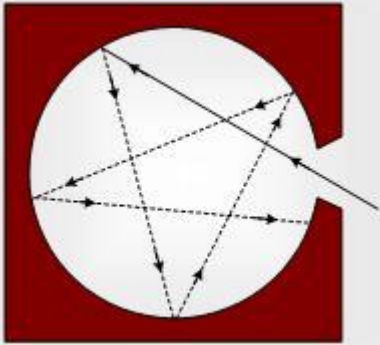
$$\lambda^{\max} = 490 \text{ nm} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898}{T} \Rightarrow T = \frac{0,002898}{\lambda^{\max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{4,9 \cdot 10^{-7}} = 5914 \text{ K}$$



Radiação de corpo negro

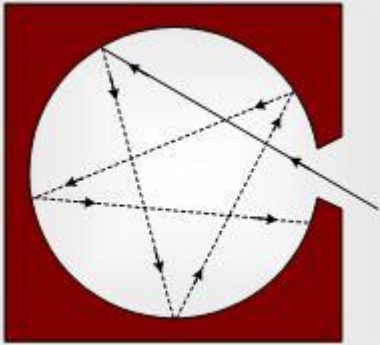
1860 Gustav Kirchhoff sugere que um orifício numa cavidade aquecida à temperatura uniforme deve ter espectro de corpo negro:



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

Radiação de corpo negro

1860 Gustav Kirchhoff sugere que um orifício numa cavidade aquecida à temperatura uniforme deve ter espectro de corpo negro:



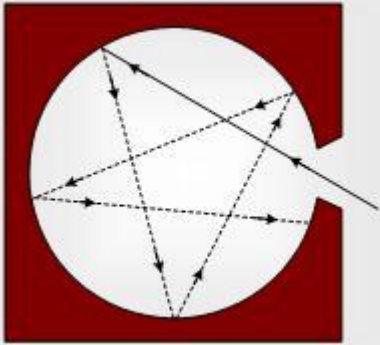
$R(\lambda) = \left(\frac{c}{4}\right) u(\lambda)$, onde $u(\lambda)$ é a densidade de energia.



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

Radiação de corpo negro

1860 Gustav Kirchhoff sugere que um orifício numa cavidade aquecida à temperatura uniforme deve ter espectro de corpo negro:



$R(\lambda) = \left(\frac{c}{4}\right) u(\lambda)$, onde $u(\lambda)$ é a densidade de energia.



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

Fazendo-se uma contagem dos modos de ondas estacionárias:

Number of modes per unit frequency per unit volume

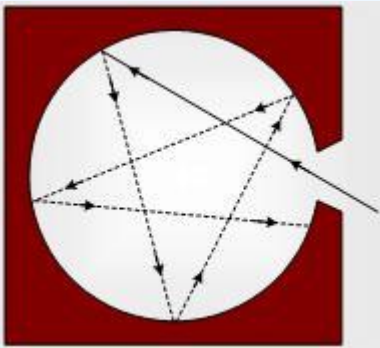
$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$$

For higher frequencies you can fit more modes into the cavity. For double the frequency, four times as many modes.

The complex block contains two square diagrams representing a rectangular cavity. The left diagram shows a few large, smooth red curves representing standing wave modes at a low frequency. The right diagram shows a much higher frequency, with many more, smaller, and more complex red curves representing a higher density of modes. The text and formula are centered between the two diagrams.

Radiação de corpo negro

1860 Gustav Kirchhoff sugere que um orifício numa cavidade aquecida à temperatura uniforme deve ter espectro de corpo negro:

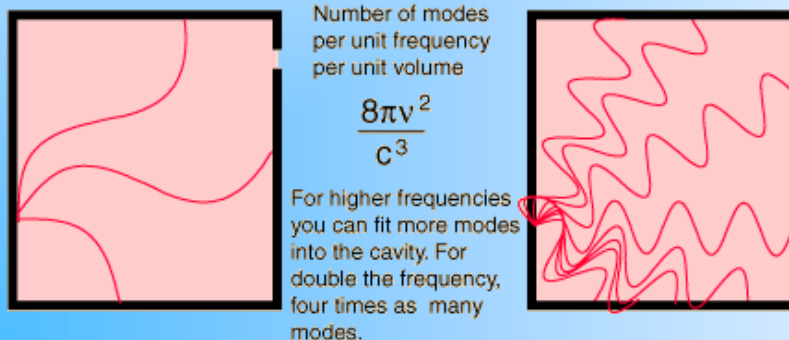


$R(\lambda) = \left(\frac{c}{4}\right) u(\lambda)$, onde $u(\lambda)$ é a densidade de energia.



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

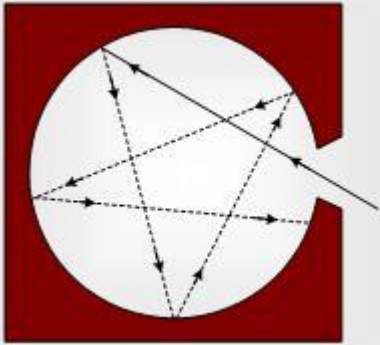
Fazendo-se uma contagem dos modos de ondas estacionárias,



vem: $u(\lambda) = n(\lambda)kT = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$

Radiação de corpo negro

1860 Gustav Kirchhoff sugere que um orifício numa cavidade aquecida à temperatura uniforme deve ter espectro de corpo negro:

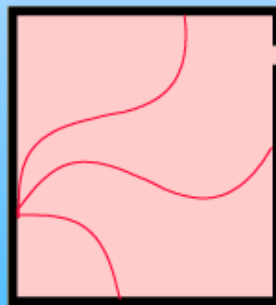


$R(\lambda) = \left(\frac{c}{4}\right) u(\lambda)$, onde $u(\lambda)$ é a densidade de energia.



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

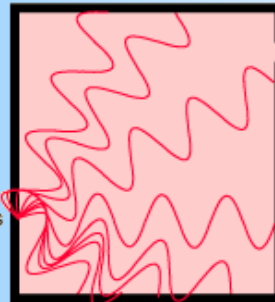
Fazendo-se uma contagem dos modos de ondas estacionárias,



Number of modes
per unit frequency
per unit volume

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$$

For higher frequencies
you can fit more modes
into the cavity. For
double the frequency,
four times as many
modes.



Lord Rayleigh (John Strutt)
(1842-1919)



James Jeans
(1877-1946)

vem: $u(\lambda) = n(\lambda)kT = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$, que é a fórmula de Rayleigh & Jeans.

Radiação de corpo negro

Mas a fórmula de Rayleigh & Jeans tinha um probleminha ...

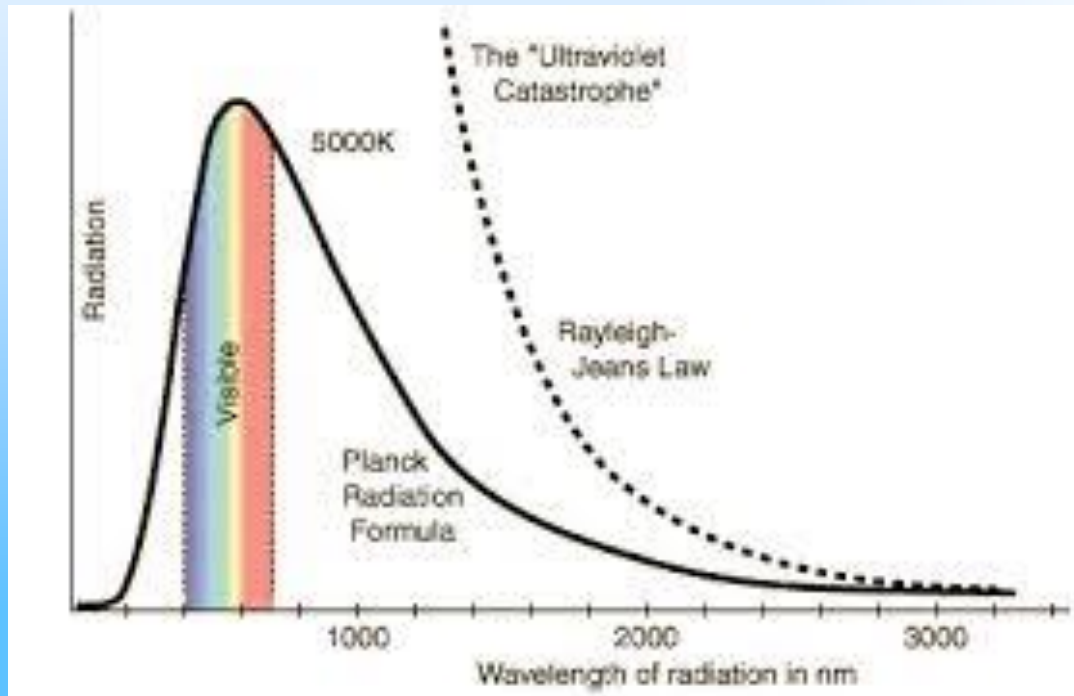
$$u(\lambda) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$



Lord Rayleigh (John Strutt)
(1842-1919)



James Jeans



A catástrofe do ultravioleta!

Radiação de corpo negro

Mas a fórmula de Rayleigh & Jeans tinha um probleminha ...

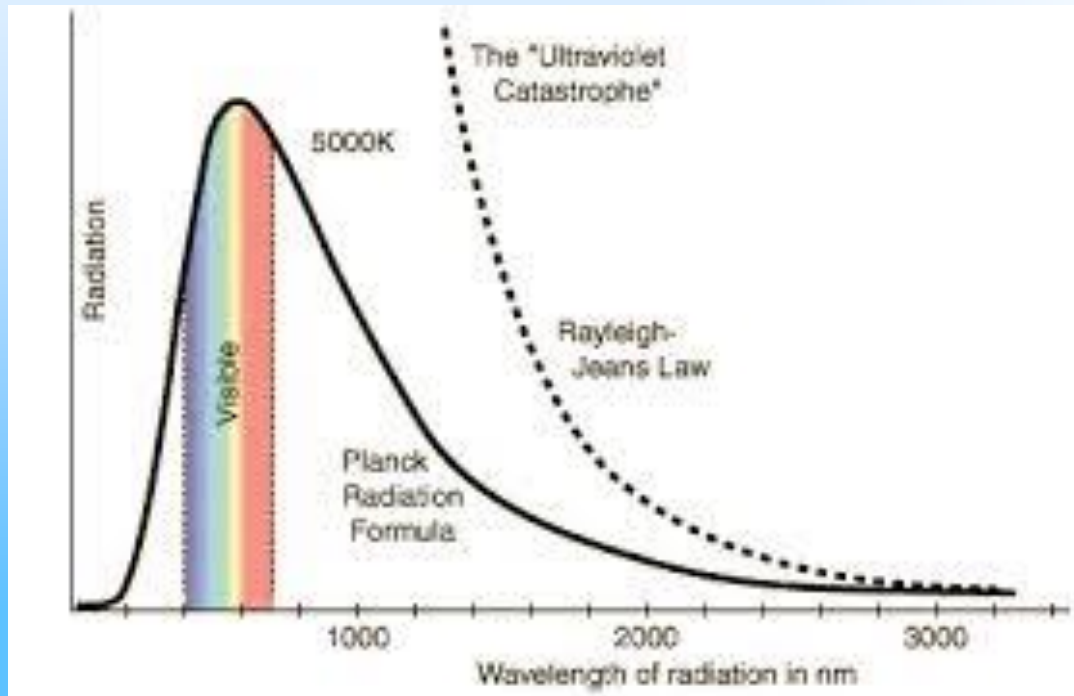
$$u(\lambda) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$



Lord Rayleigh (John Strutt)
(1842-1919)



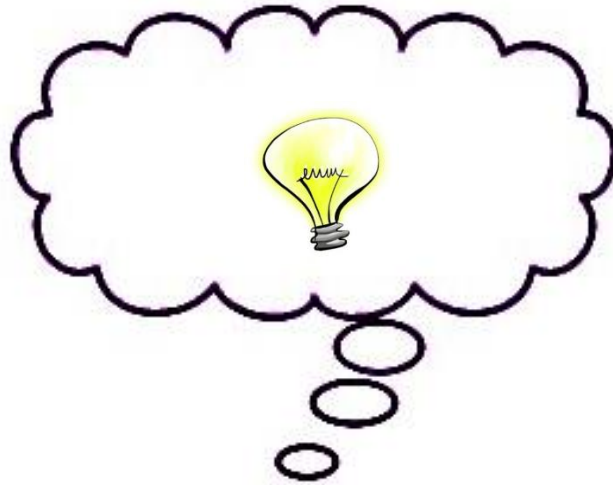
James Jeans



A catástrofe do ultravioleta!

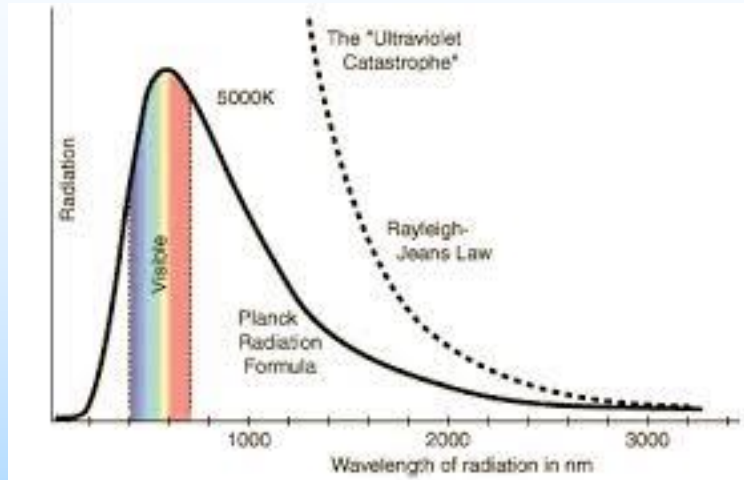
► Por que a radiação emitida pelos metais aquecidos deve ser infinita de acordo com a física clássica?

A ideia de Planck

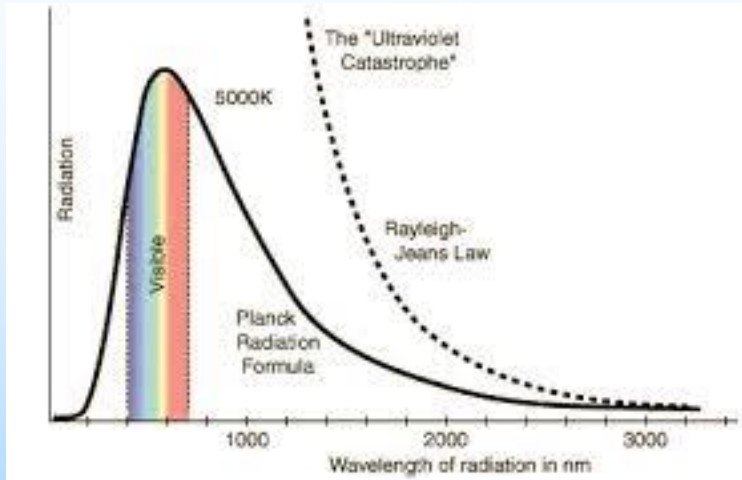


Max Planck
(1858-1947)

Radiação de corpo negro

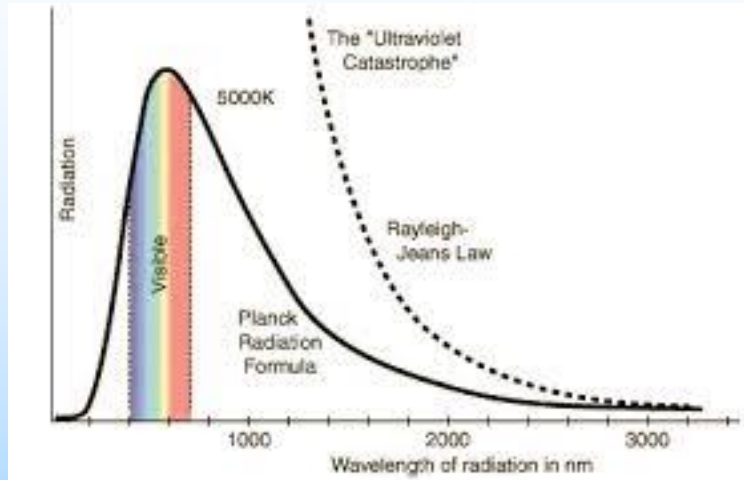


Radiação de corpo negro



$$\langle E \rangle = \int E \cdot p(E) dE \rightarrow \langle E \rangle = \sum_n E_n \cdot p_n(E)$$

Radiação de corpo negro



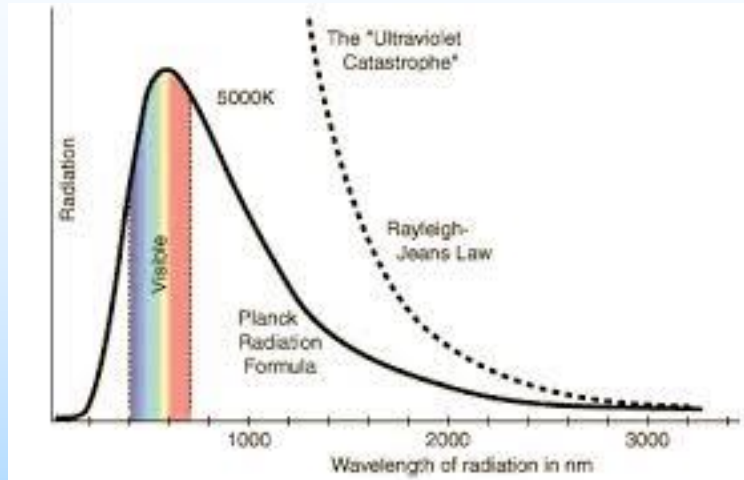
$$\langle E \rangle = \int E \cdot p(E) dE \rightarrow \langle E \rangle = \sum_n E_n \cdot p_n(E)$$

Hipótese do quantum de energia:

As moléculas vibrantes somente podem ter valores de energia **quantizados** (discretos):

$$E_n = n(hf)$$

Radiação de corpo negro



$$\langle E \rangle = \int E \cdot p(E) dE \rightarrow \langle E \rangle = \sum_n E_n \cdot p_n(E)$$

Hipótese do quantum de energia:

As moléculas vibrantes somente podem ter valores de energia **quantizados** (discretos):

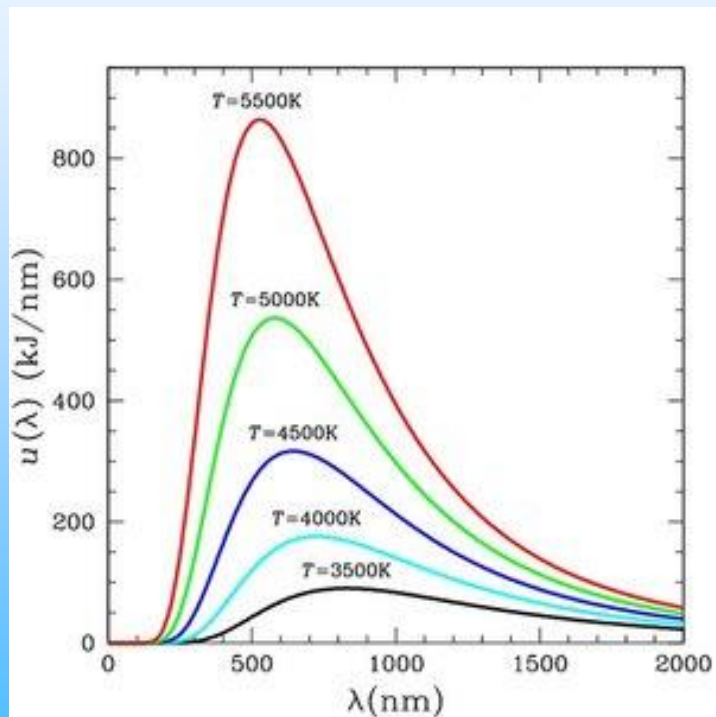
$$E_n = n(hf),$$

onde f é a frequência, n o número quântico e h a constante de Planck:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$$

Radiação de corpo negro

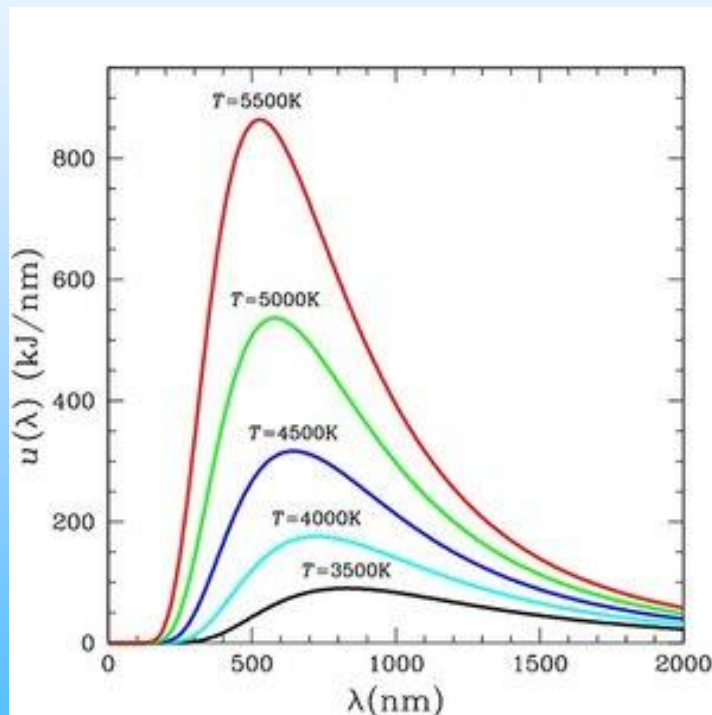
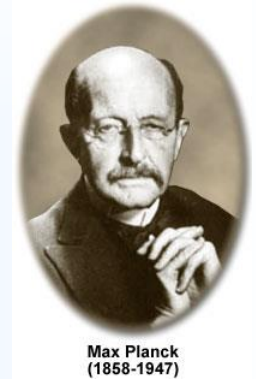
1900 Max Planck, com a hipótese da quantização das energias:



$$E_n = n(hf)$$

Radiação de corpo negro

1900 Max Planck, com a hipótese da quantização das energias, formula uma lei de distribuição que se ajustava perfeitamente aos dados em todos os comprimentos de onda:

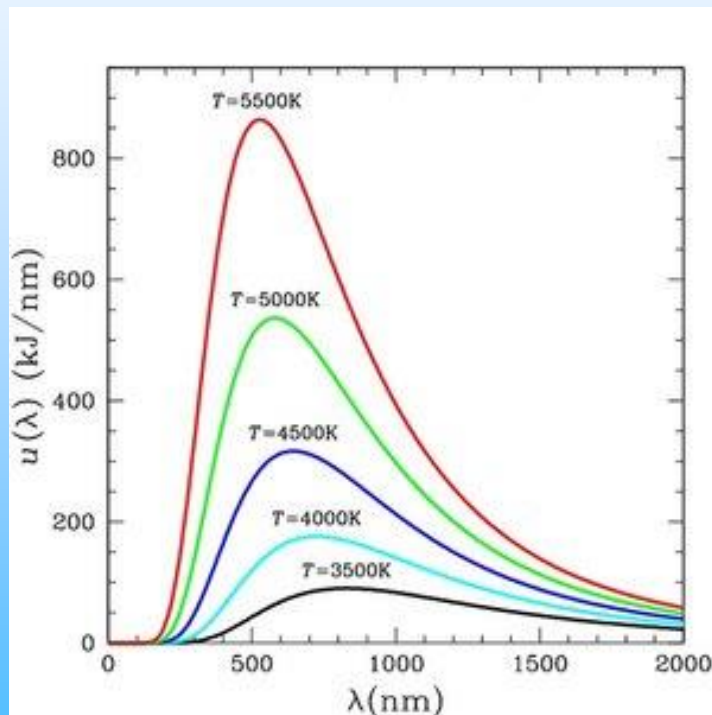


$$E_n = n(hf) \Rightarrow$$

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Radiação de corpo negro

1900 Max Planck, com a hipótese da quantização das energias, formula uma lei de distribuição que se ajustava perfeitamente aos dados em todos os comprimentos de onda:



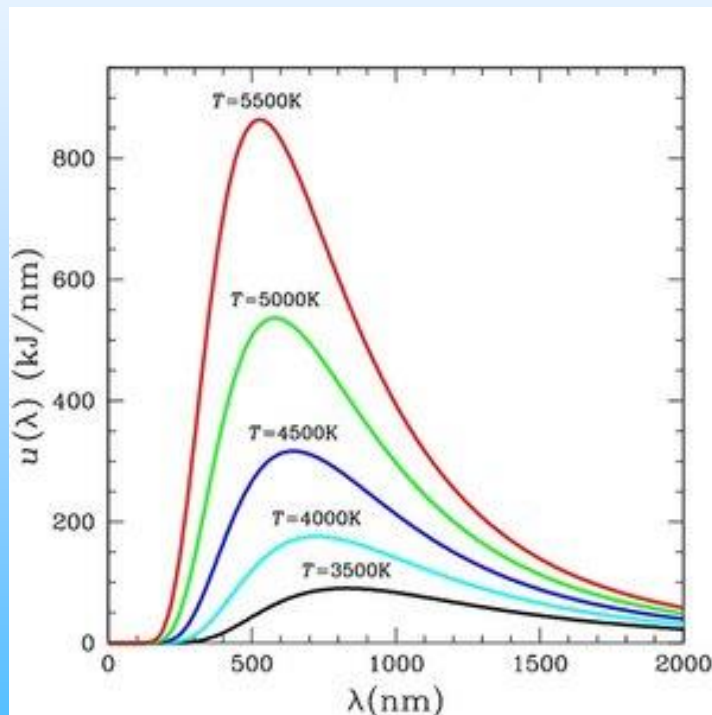
$$E_n = n(hf) \Rightarrow$$

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ é a constante de Planck.

Radiação de corpo negro

1900 Max Planck, com a hipótese da quantização das energias, formula uma lei de distribuição que se ajustava perfeitamente aos dados em todos os comprimentos de onda:



Max Planck
(1858-1947)



1918

$$E_n = n(hf) \Rightarrow$$

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ é a constante de Planck.

Na lápide de seu túmulo, em Göttingen (Alemanha):

