



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

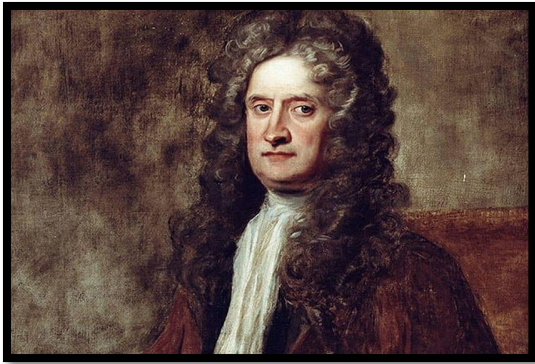


**Física Moderna: história, aplicações e vestibular**

## **TEMA 1**

# **“EQUAÇÃO DE PLANCK”**

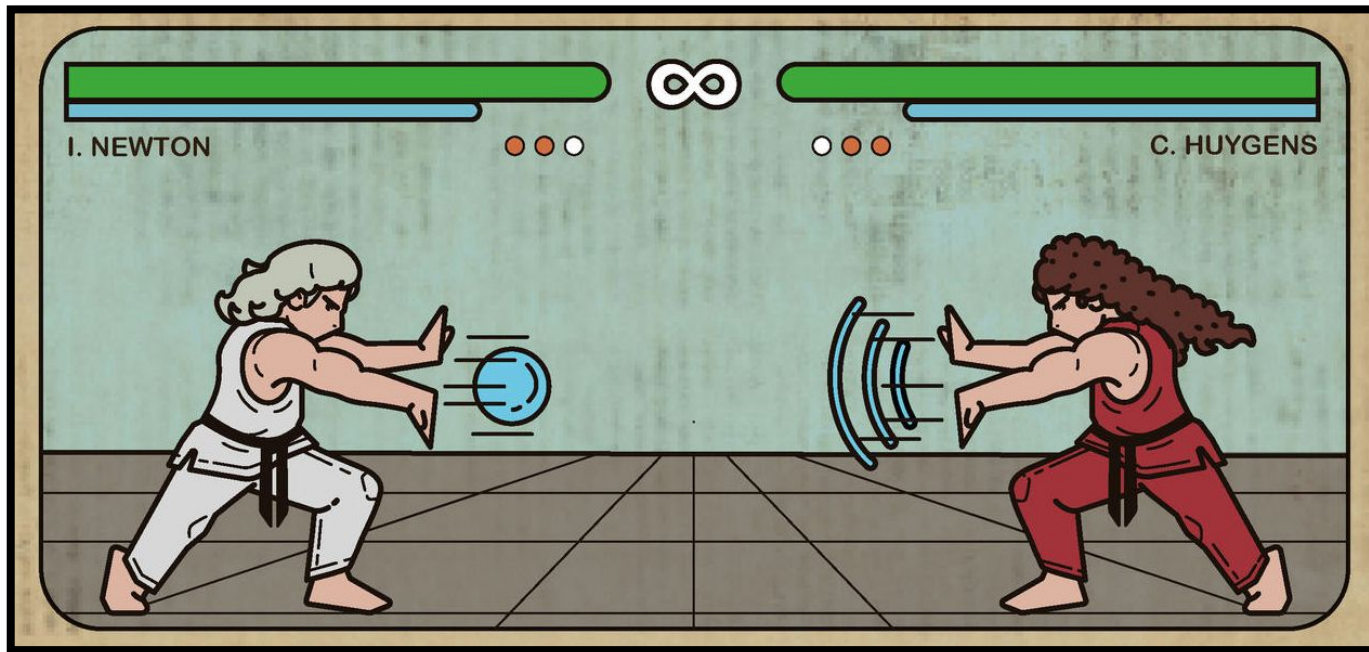
**Prof. Dr. Yuri Alexandre Meyer**



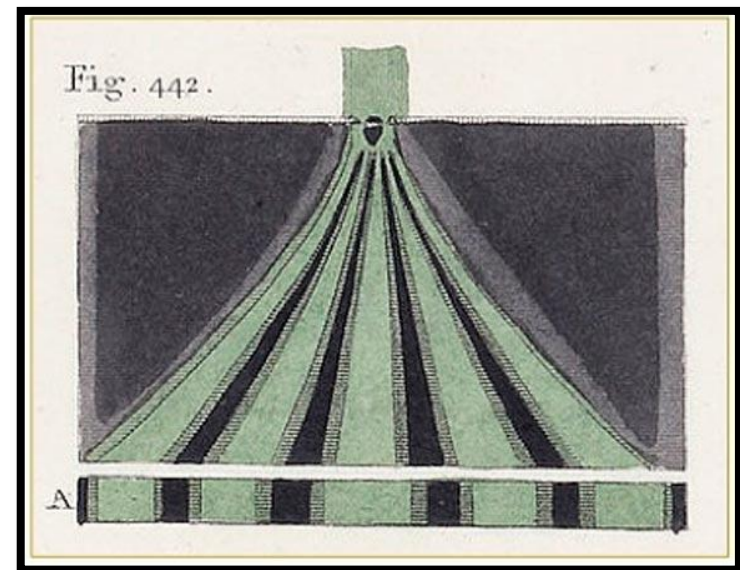
Sir Isaac Newton  
(1642 – 1727)

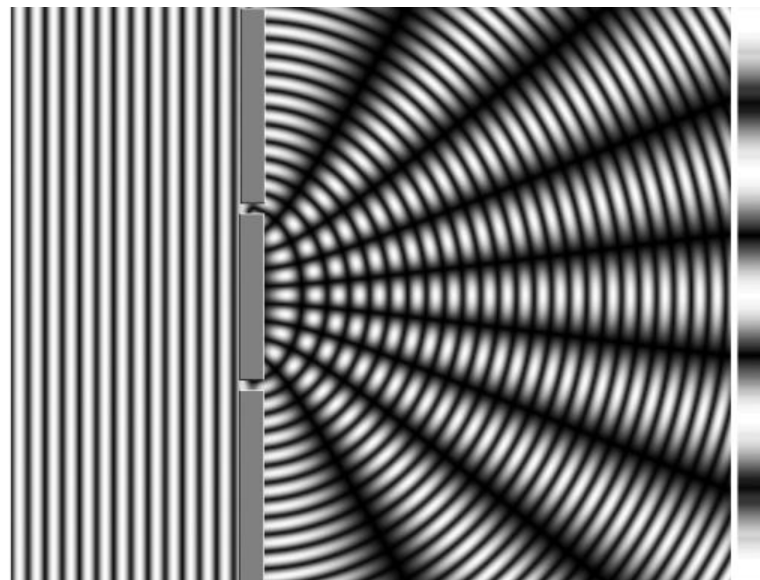


Christiaan Huygens  
(1629 – 1695)



Foi o médico inglês Thomas Young que propôs um experimento a partir do qual, os cientistas não tiveram mais dúvida quanto à natureza da luz: **a luz era uma onda e não partículas como imaginava Isaac Newton.**

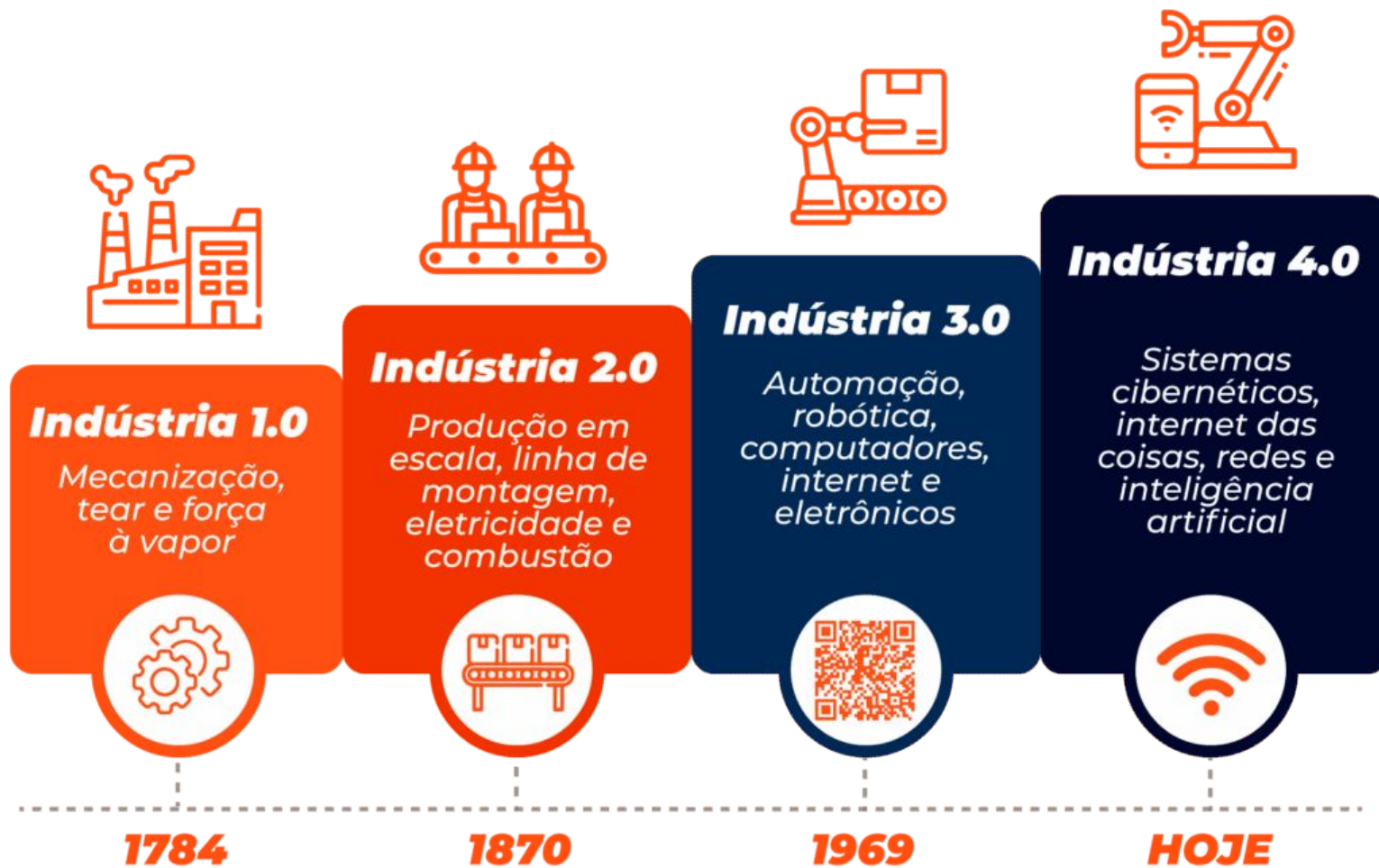




**Thomas Young**  
(13 June 1773 – 10 May 1829)

**“A FENDA DUPLA DE YOUNG”**

**A LUZ É ONDA !**



**1880 a 1910:** Alguns fenômenos estavam sendo observados que não conseguiam ser explicados pela mecânica clássica.

A maioria desses fenômenos estavam relacionados a radiação (luz).

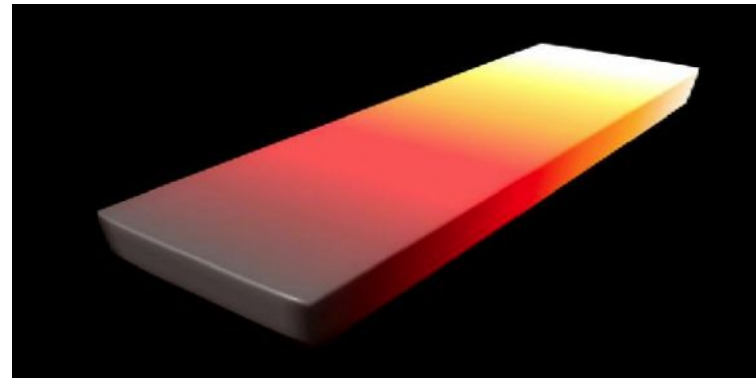
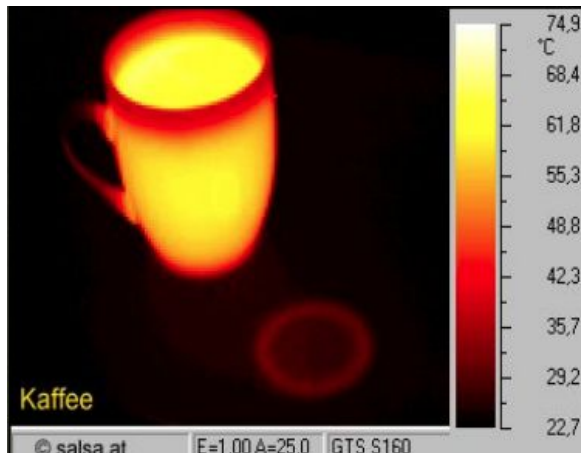
**Emissão de radiação por matéria quente**

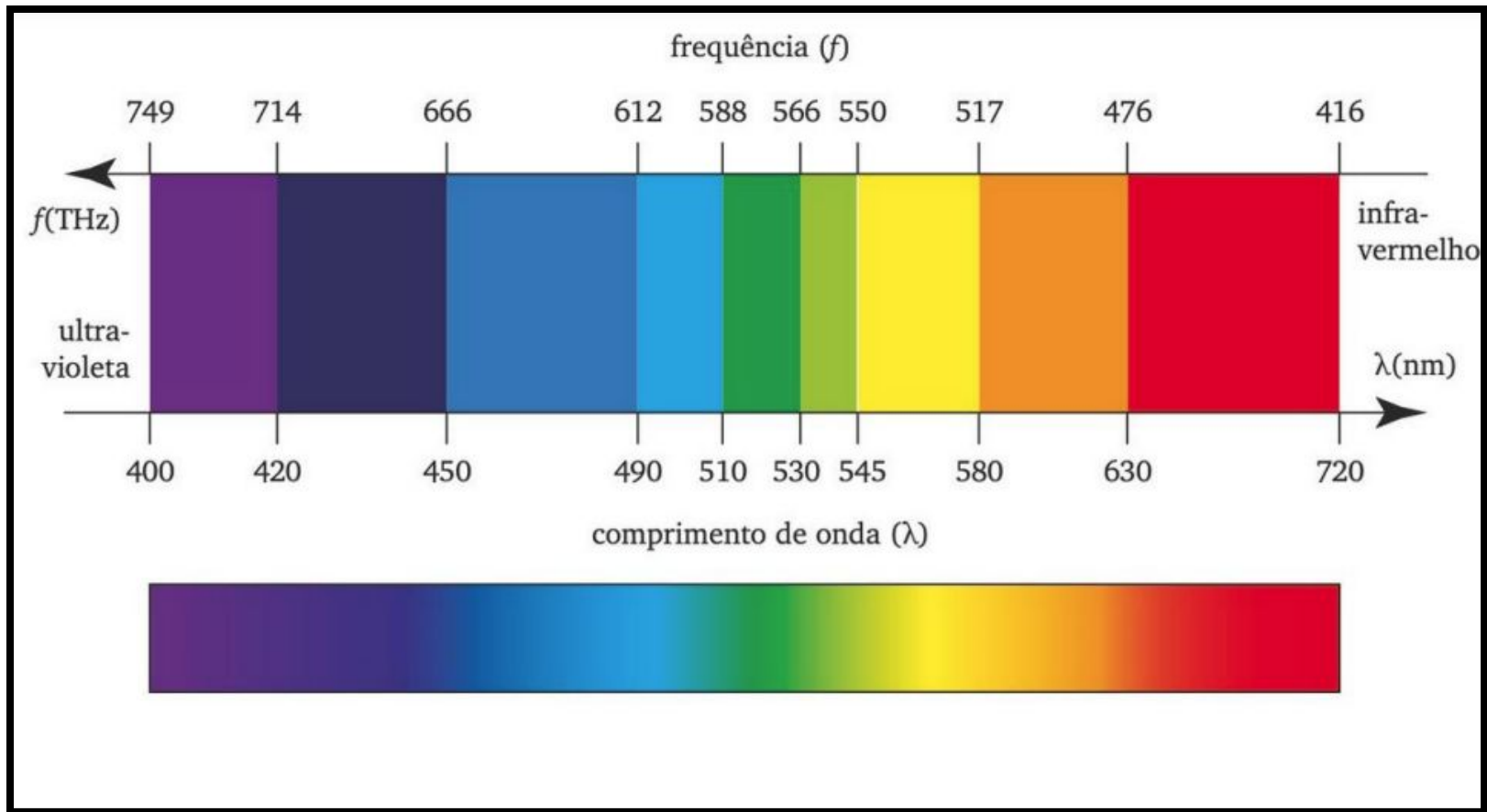


**Efeito fotoelétrico**

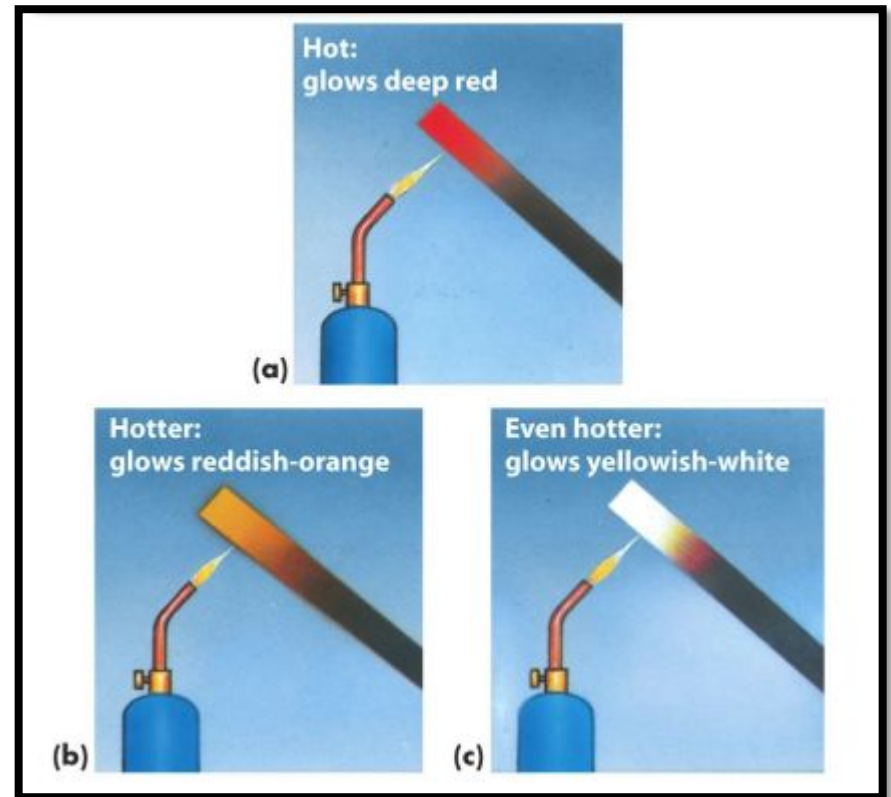
**Raio-x**

**Espectro de linhas de átomos.**





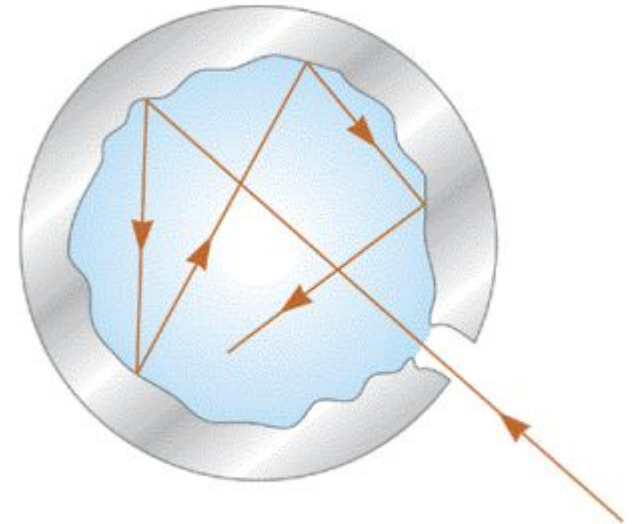
Observação – regra geral - Quanto mais alta a temperatura mais intensa é a emissão de radiação eletromagnética e menor é o comprimento de onda





- ❑ Corpo negro é um sistema ideal
- ❑ Não reflete luz
- ❑ Toda luz incidente é absorvida  
(absorvedor perfeito)
- ❑ Toda luz absorvida é reemitida  
(emissor perfeito)
- ❑ Emissão devido a temperatura
- ❑ Comparado com um outro corpo qualquer, à mesma temperatura, um corpo negro irradia igual ou mais energia.
- ❑ A irradiação ocorre difusa e isotrópica  
(sem direção preferencial).

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e  
Figure 28.1



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

❑ No final do século XIX, o físico Stefan observou que as áreas sob as curvas de distribuição de emissão de radiação de corpo negro (ver figura) eram sempre proporcionais a  $T^4$ ; ou seja, a **potência de radiação total emitida** pode ser escrita como:

$$P = \sigma A e T^4$$

A é a área superficial do corpo

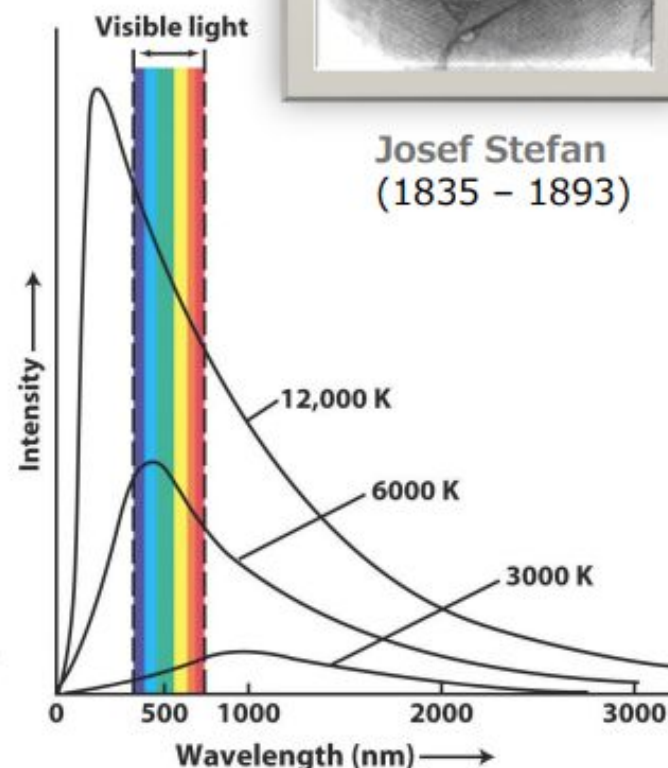
T temperatura absoluta

$\sigma$  é a constante de Stefan  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

$e=1$  para o caso de um corpo negro.



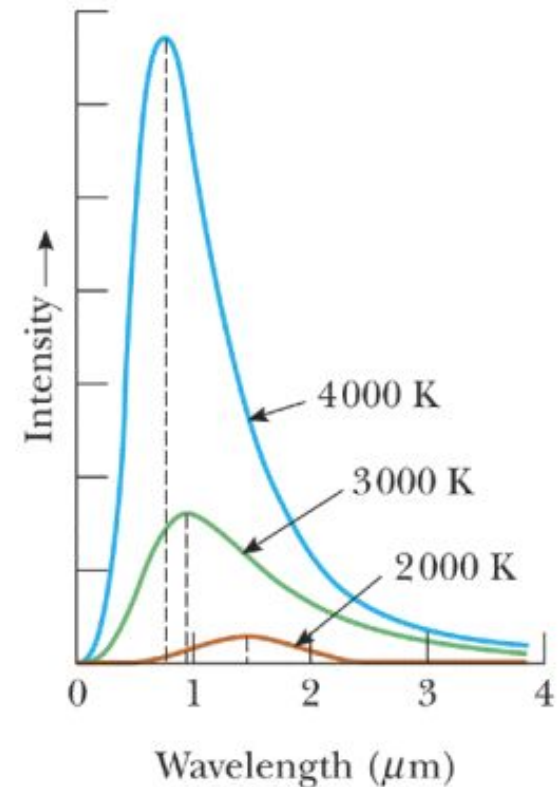
Josef Stefan  
(1835 – 1893)



- ☐ Wilhelm Wien também notou que o máximo de cada curva de distribuição de emissão de radiação se deslocava com a temperatura  $T$  do corpo, de forma que em 1893 ele propôs a equação:

$$\lambda_{max}T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$

onde  $\lambda_{max}$  é o valor do comprimento de onda em que a distribuição atinge seu valor de máximo (pico).

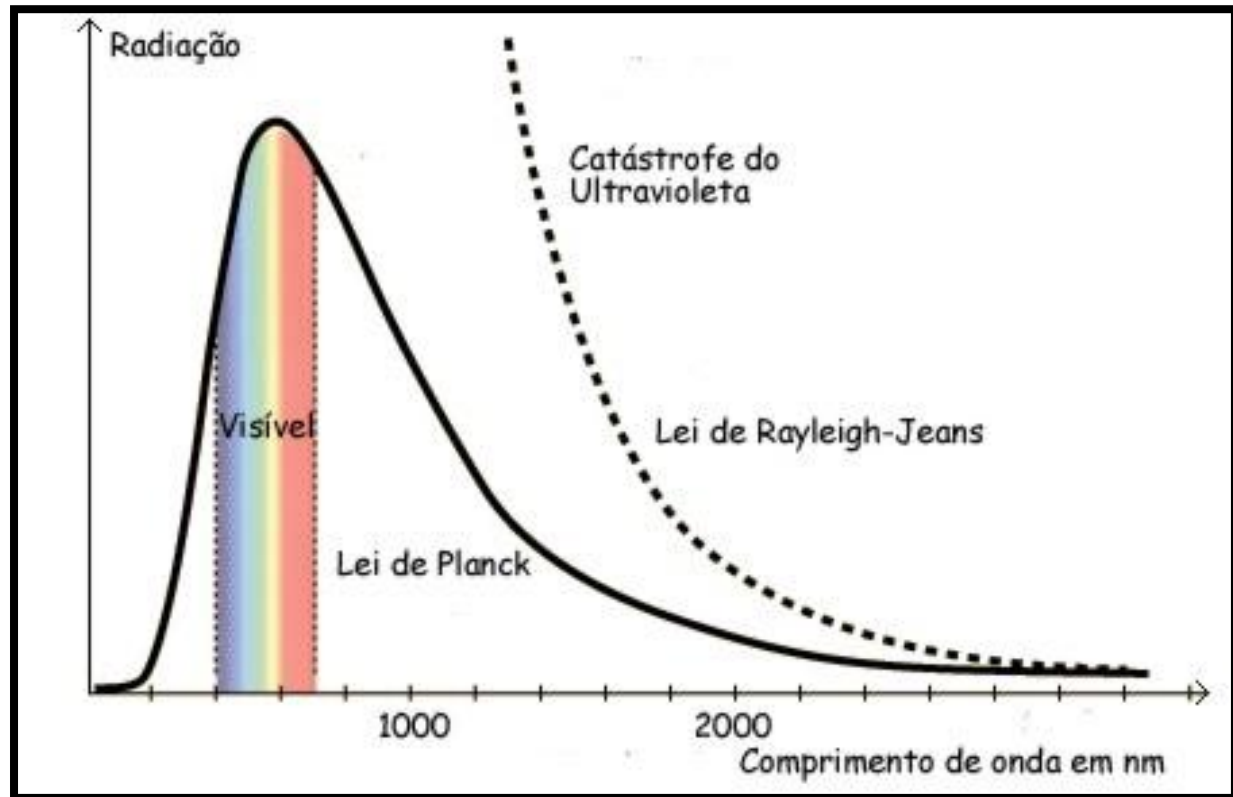


- ❑ A questão mais importante, no entanto, era saber por quais mecanismos físicos se dá a emissão de radiação.
- ❑ Do ponto de vista clássico, a emissão da radiação deveria acontecer devido à agitação térmica das cargas que compõem os átomos/moléculas do corpo à temperatura absoluta  $T$  (cargas aceleradas é que irradiam).
- ❑ No início do século XX os físicos britânicos Lord Rayleigh e Sir James Jeans deduziram uma expressão clássica para a radiação emitida por um corpo negro, supondo os átomos que compõem as paredes como sendo osciladores que poderiam **emitir em todos os comprimentos de onda**, para uma certa temperatura  $T$  do corpo eles chegaram na expressão:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

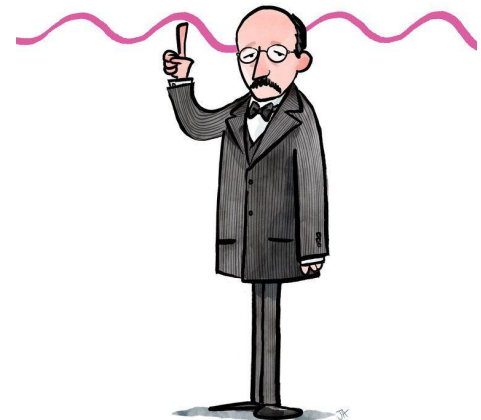
Sendo  $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} = \text{constante de Boltzman}$

- ❑ Quando o gráfico desta equação foi feito, verificou-se que os dados experimentais só eram razoavelmente bem ajustados na região correspondente a valores muito grandes de  $\lambda$ . Para  $\lambda \rightarrow 0$ , porém, obtinha-se que  $I \rightarrow \infty$ !
- ❑ Este comportamento ficou conhecido com “**Catástrofe do Ultravioleta**”.



- ❑ Em 1900, o físico alemão Max Planck apresentou uma equação que ele obteve ajustando de forma empírica os dados experimentais.
- ❑ Planck propôs que a irradiação deveria corresponder à emissão pelos osciladores das paredes internas do corpo negro mas considerando que os osciladores não irradiam em todos os comprimentos de onda mas em apenas algumas bem específicas.

$$E = n \frac{hc}{\lambda} = nh\nu$$

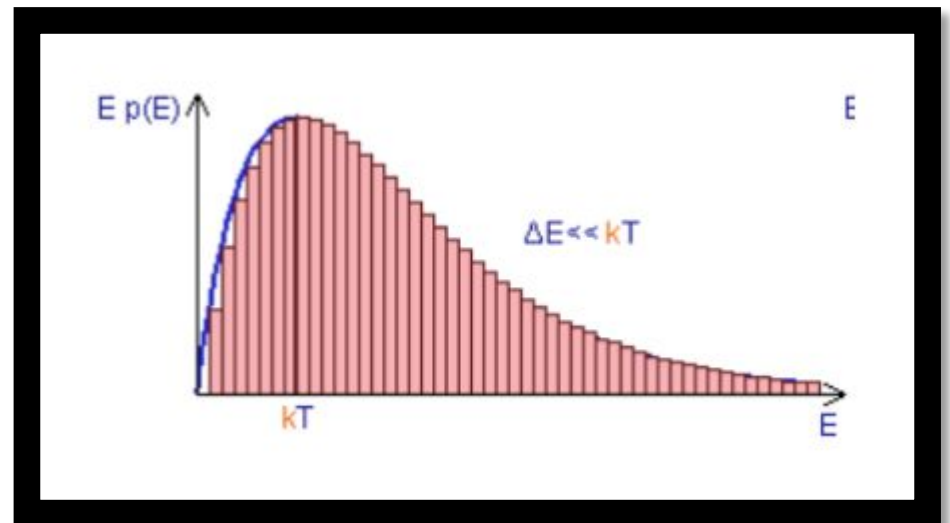


- ❑ Max Planck propôs então que ao invés de integração deveríamos fazer uma soma das contribuições discretas de energia.

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1)}$$

A constante de normalização foi a constante “h”

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

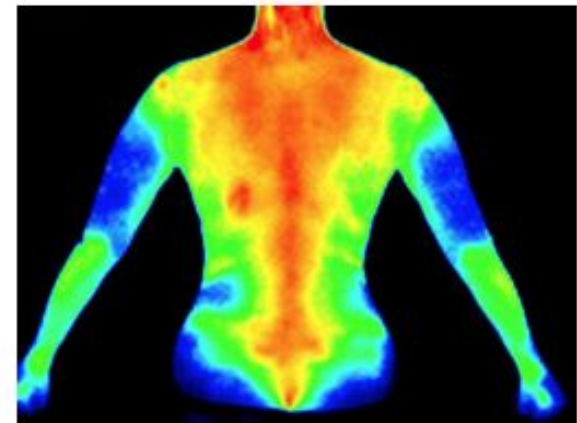


Exercício: Determine os valores máximos do comprimento de onda e frequência correspondentes à irradiação térmica emitido pelo corpo humano ( $T = 35^{\circ}\text{C} = 308\text{K}$ ).

Pela lei do deslocamento de Wien:  $\lambda_{max}T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{T} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{308} = 9400 \text{ nm}$$

Infravermelho distante



$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}}{9400 \times 10^{-9} \text{ m}} = 3,2 \times 10^{13} \text{ Hz}$$



O raio do Sol é  $R_{\text{sol}} = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$  e ele emite uma potência total  $P = 3,77 \times 10^{26} \text{ W}$ .

a) Supondo que ele irradia como um corpo negro, determine a temperatura na superfície.

b) Encontre  $\lambda_{\text{máx}}$  para o Sol a partir do item anterior.

Pela lei de Stefan Boltzman  $P = \sigma AT^4$

$$T^4 = \frac{P}{\sigma A} = \frac{3,77 \times 10^{26} \text{ W}}{(5,67 \times 10^{-8})(4\pi)(6,96 \times 10^8)^2} = 1,09 \times 10^{15}$$

$$T = 5750 \text{ K}$$

Pela lei do deslocamento de Wien:  $\lambda_{\text{max}}T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{T} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{5750} = 504 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{max}}^{\text{Sol}} = 504 \text{ nm}$$

Região do amarelo

Um corpo de massa  $m = 2 \text{ kg}$  está preso a uma mola de massa desprezível e constante elástica  $K = 25 \text{ N/m}$ . A mola é esticada a  $x_0 = 0,4\text{m}$  da sua posição de equilíbrio e depois é solta.

- Determine a energia total e a frequência do sistema do ponto de vista clássico.
- Admita a quantização da energia e calcule o número quântico  $n$  do sistema.
- Qual a variação de energia do sistema quando o oscilador efetua uma transição ao próximo estado quântico de nível mais baixo?

$$\text{Energia: } E = \frac{1}{2}K(x_0)^2 = \frac{1}{2}25(0,4)^2 \Rightarrow E = 2\text{J}$$

$$\text{Numero quântico: } f_{osc} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{25}{2}} \Rightarrow f = 0,56 \text{ Hz}$$

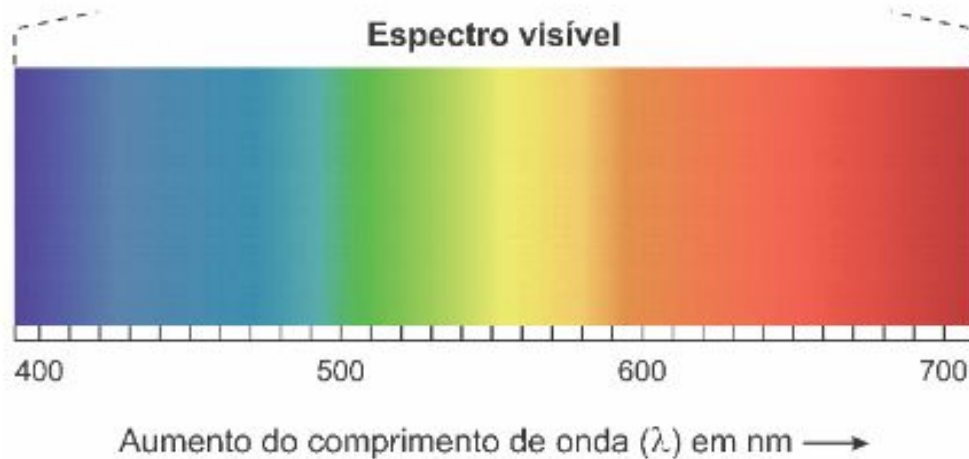
$$E = nhf \Rightarrow n = \frac{E}{hf} = \frac{2}{(6,63 \times 10^{-34})(0,56)} \Rightarrow n = 5,4 \times 10^{33}$$

$$\text{Variação de energia: } \Delta E = E_n - E_{n-1} = nhf - (n-1)hf = hf = (6,63 \times 10^{-34})(0,56)$$

$$\Delta E = 3,7 \times 10^{-34}\text{J}$$

**Energia extremamente pequena para ser medida**

12. (Fuvest 2022) O laser consiste em uma fonte de luz coerente e monocromática, sendo largamente utilizado em leitores de códigos de barras e também em aplicações na física, na medicina e em outras áreas. Seu princípio de funcionamento é baseado na emissão estimulada de fótons. Em um tipo comum de *laser*, uma quantidade de átomos é excitada para um estado de energia  $E_2$ . Em seguida alguns desses átomos são estimulados a decair para um estado de energia menor  $E_1$ , emitindo um fóton com energia dada pela diferença entre  $E_2$  e  $E_1$ . De modo similar, esse decaimento estimula outros átomos a emitirem fótons formando um processo em cadeia com geração de luz.



- a) Qual tipo de laser emite fótons com maior energia: o de luz vermelha ou o de luz azul? Justifique sua resposta.
- b) Determine a frequência (em Hz) de um fóton com comprimento de onda na região de cor laranja mostrada na figura.
- c) Determine o comprimento de onda de um fóton (em nm) considerando um laser cujas energias  $E_2$  e  $E_1$  correspondem aproximadamente a 20,2 eV e 18,7 eV, respectivamente.

**Note e adote:**

A energia  $E$  de um fóton relaciona-se com sua frequência  $f$  por meio da relação  $E = hf$ , onde  $h = 4 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$  e a frequência é dada em Hz.

Velocidade da luz no vácuo:  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Legenda para daltônicos: Gráfico do espectro visível com cores em função do comprimento de onda, que se inicia no azul (lado esquerdo a 400 nm), passando pelo verde (500 nm), amarelo (550 nm), laranja (600 nm) e terminando no vermelho (lado direito a 700 nm).

# Theoretical physicist Max Planck

Instagram @PhilosophyOfCosmology



Before discovering  
Quantum Physics



After discovering  
Quantum Physics