

Física IV

2020

Professor: Valdir Guimarães

E-mail: valdir.guimaraes@usp.br

Aula-10: radiação corpo negro e fotoelétrico

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

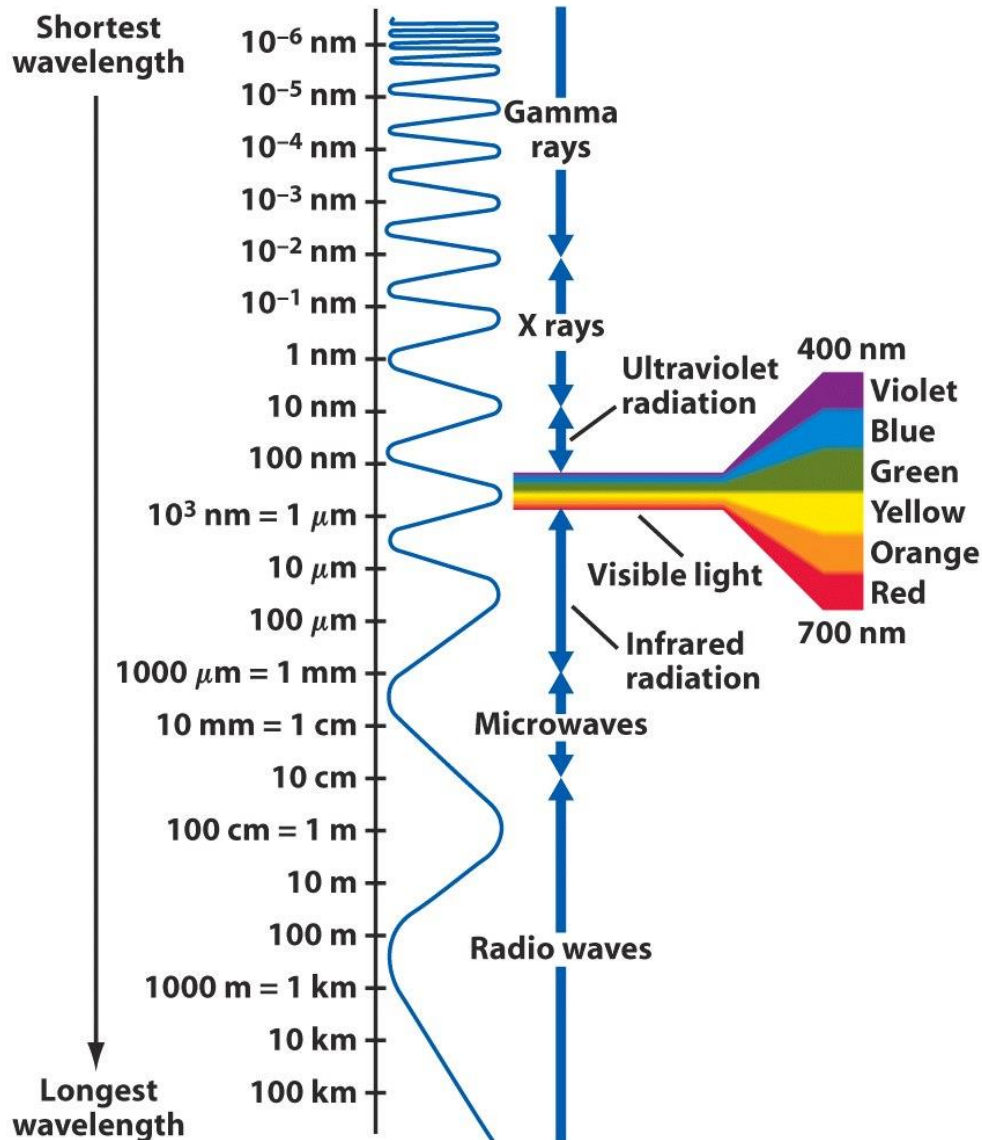


Efeito fotoelétrico

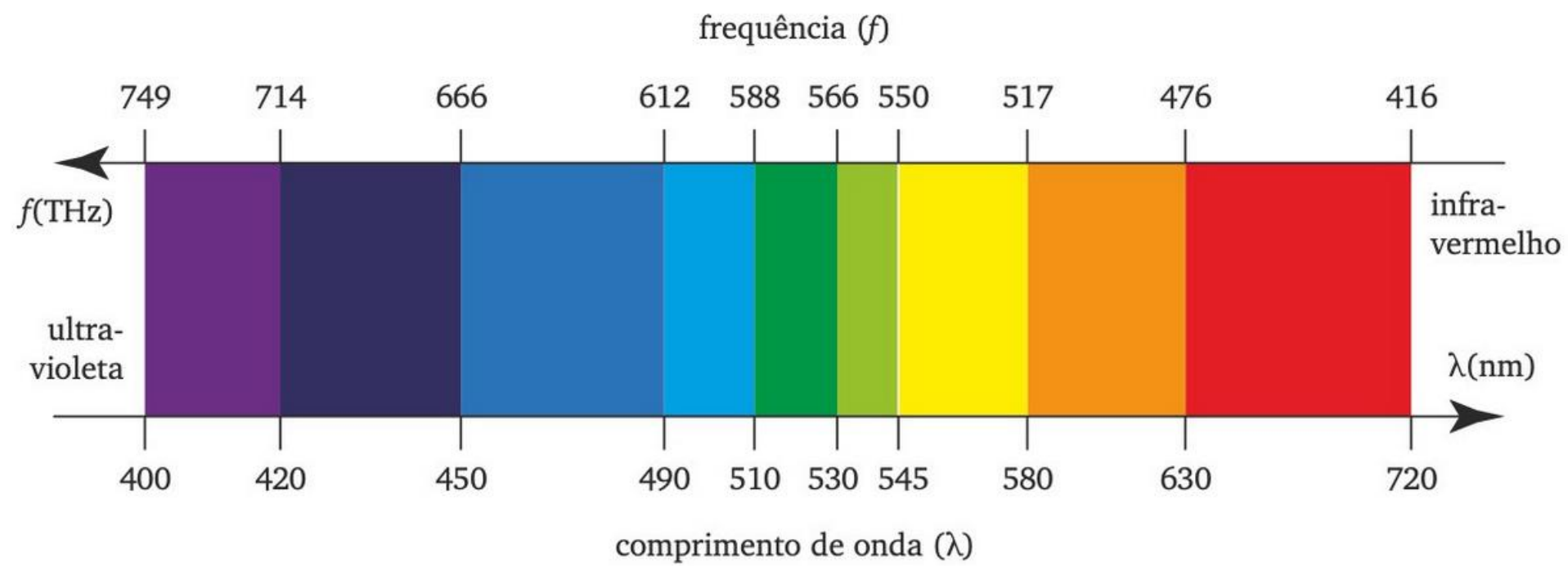
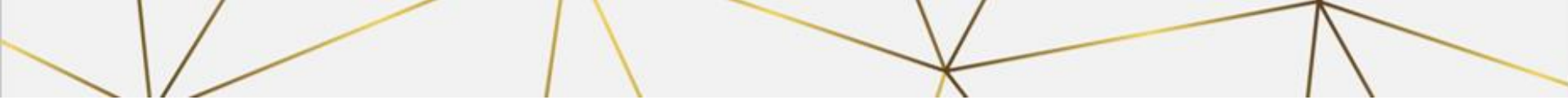
Raio-x

Espectro de linhas de átomos.

Espectro eletromagnético



- Luz Visível** entre 400 e 700 nm
- Ondas de Radio: 1 m
- Microonda: 1 mm
- Radiação Infravermelha: $1 \mu\text{m}$
- Radiação Ultravioleta: 100 nm
- Raio-X: 1 nm
- Raios-Gamma: 10^{-3} nm

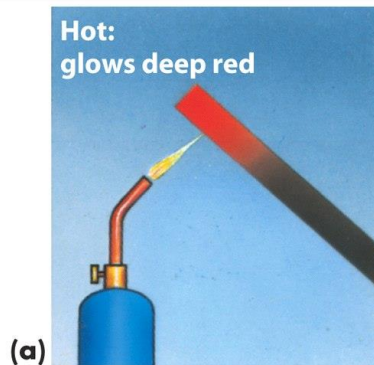


Emissão de radiação devido a temperatura

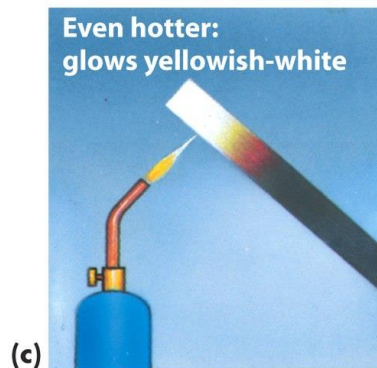
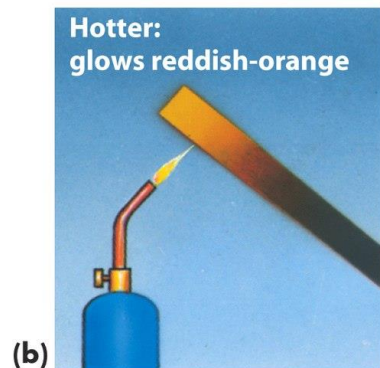
Observação – regra geral - Quanto mais alta a temperatura mais intensa é a emissão de radiação eletromagnética e menor é o comprimento de onda

Um exemplo é uma barra de ferro aquecida.

Conforme aumentamos a temperatura a barra fica mais brilhante e a cor também muda.



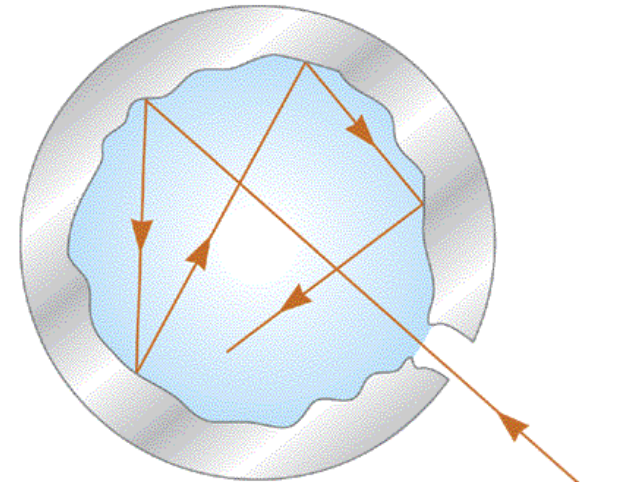
Corpo humano emite radiação na frequência do infravermelho



Radiação de corpo negro

- ❑ 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.

Lei de Stefan Bolstzman

- ❑ 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:

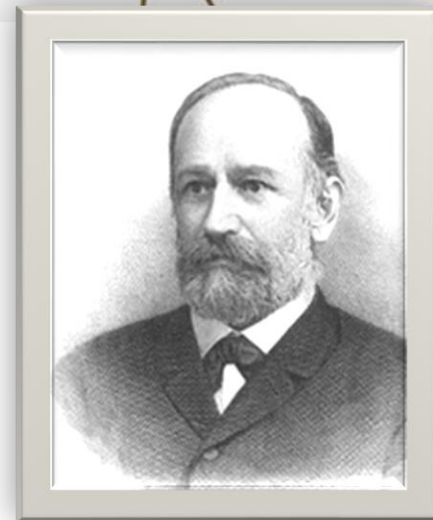
$$P = \sigma A e T^4$$

A é a área superficial do corpo

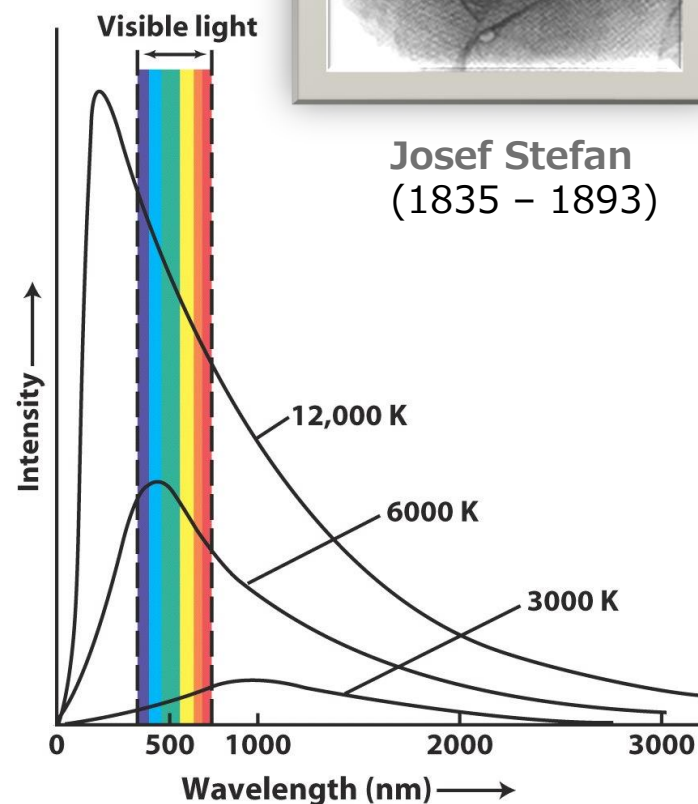
T temperatura absoluta

σ 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)

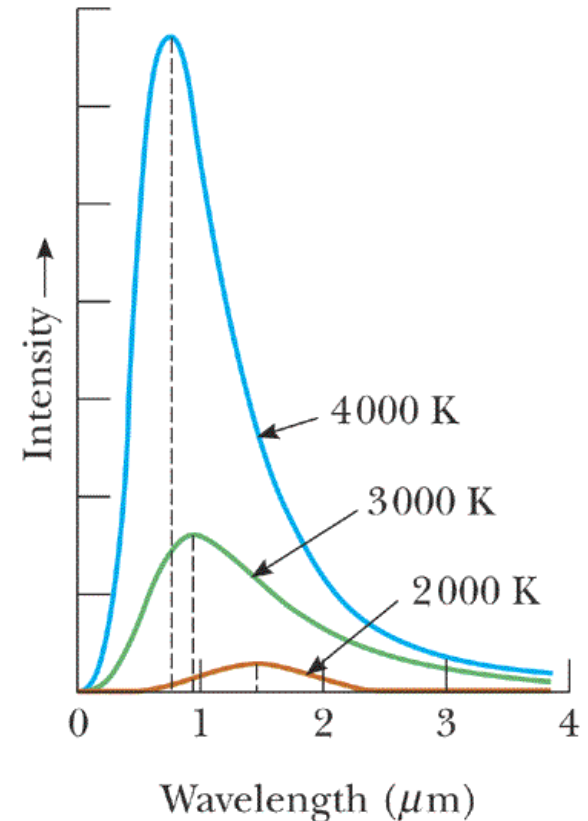


- ❑ Wilhelm Wien também notou que o máximo de cada curva de distribuição de emissão de radiação se deslocava com a temperatura T do corpo, de forma que em 1893 ele propôs a equação:

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

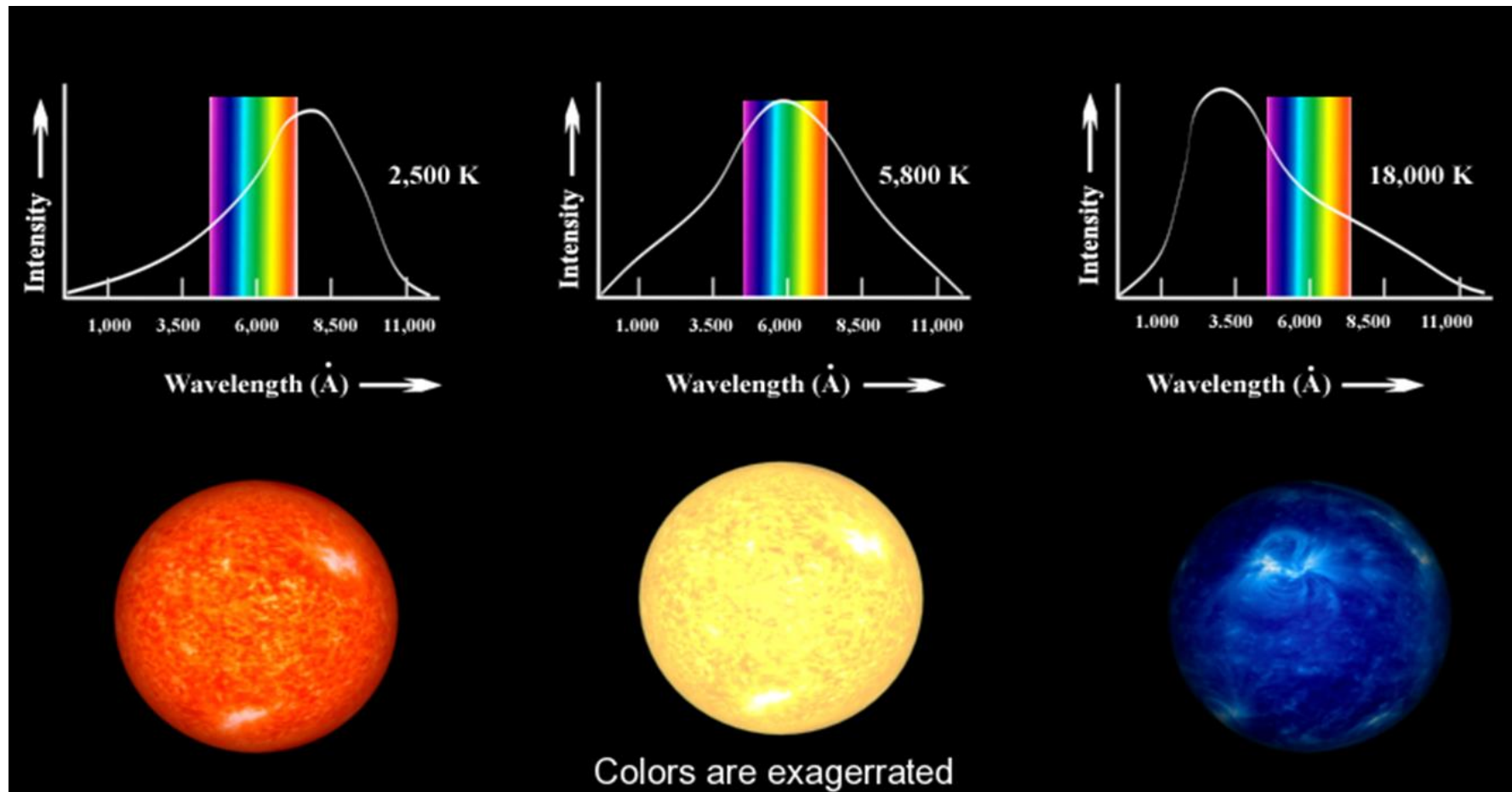
onde λ_{max} é o valor do comprimento de onda em que a distribuição atinge seu valor de máximo (pico).

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 28.2



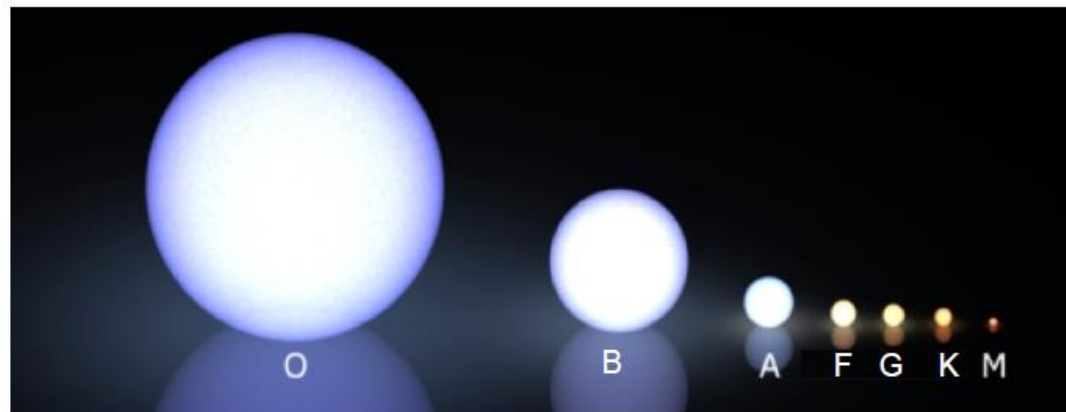
Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Emissão de radiação por estrelas



Classificação das estrelas por radiação

O	estrelas azuis , $T_{ef}=20\ 000$ a $35\ 000$ K, apresentam linhas de HeII (hélio uma vez ionizado) e ultravioleta forte. (Orion, uma das Três Marias).
B	estrelas branco-azuladas , $T_{ef}=15\ 000$ K, com linhas de HeI.
A	estrelas brancas , $T_{ef}=9000$ K, com linhas de HI forte; Sírius e Vega
F	estrelas branco-amareladas , $T_{ef}=7000$ K, com linhas de metais observadas. Exemplos: Canopus
G	estrelas amarelas , $T_{ef}=5500$ K, como o Sol , com fortes linhas de metais e HI fraco. CaI (H e K) fortes.
K	estrelas alaranjadas , $T_{ef}=4000$ K, com linhas metálicas dominantes. Contínuo azul fraco. Exemplos: Aldebarã e Arcturus
M	estrelas vermelhas , com $T_{ef}=3000$ K, com bandas moleculares (TiO) muito fortes . Exemplos: Betelgeuse e Antares.



Espectro da Radiação Solar (Terra)

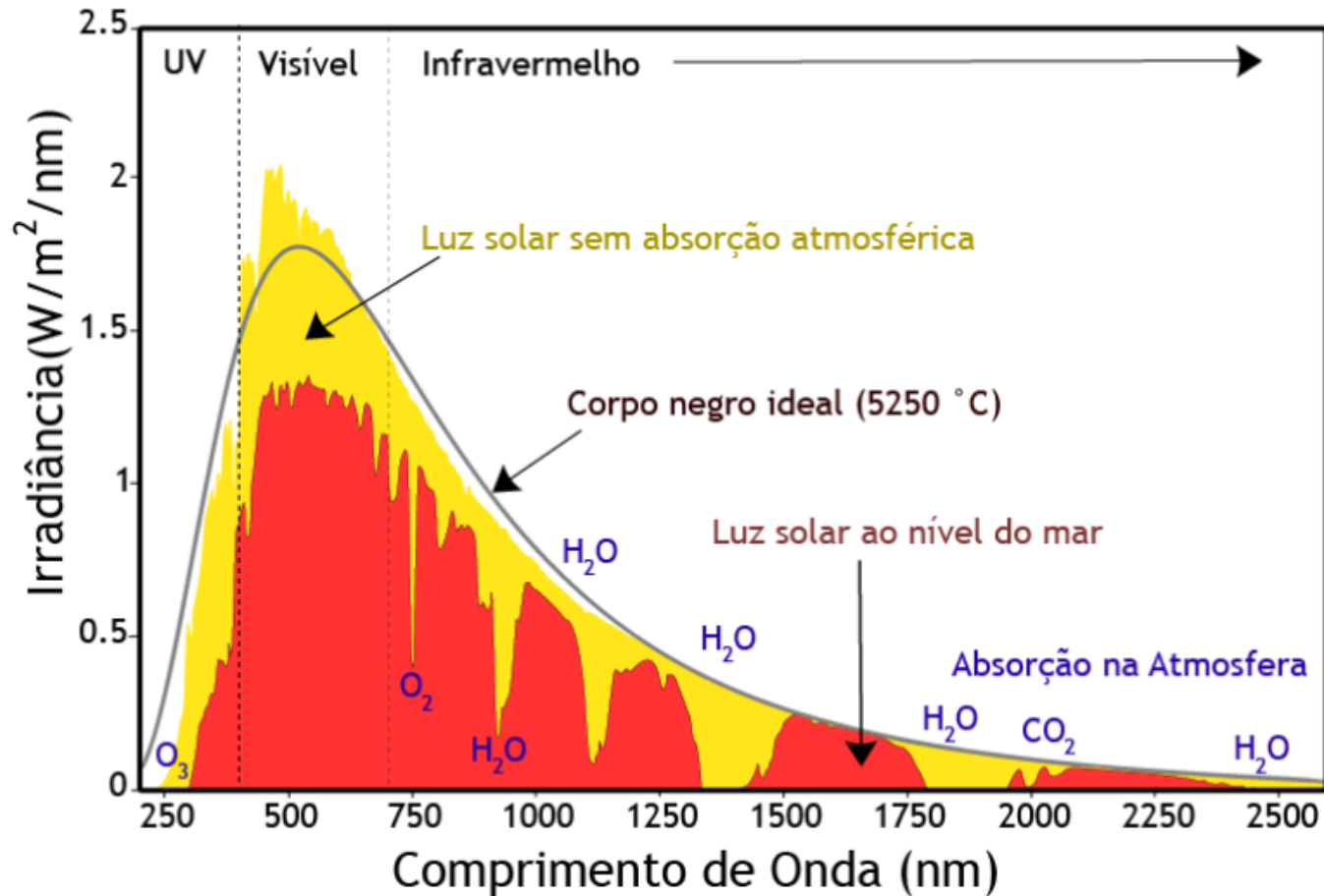


Figura 4. Espectro da Luz Solar – Fonte: [4]

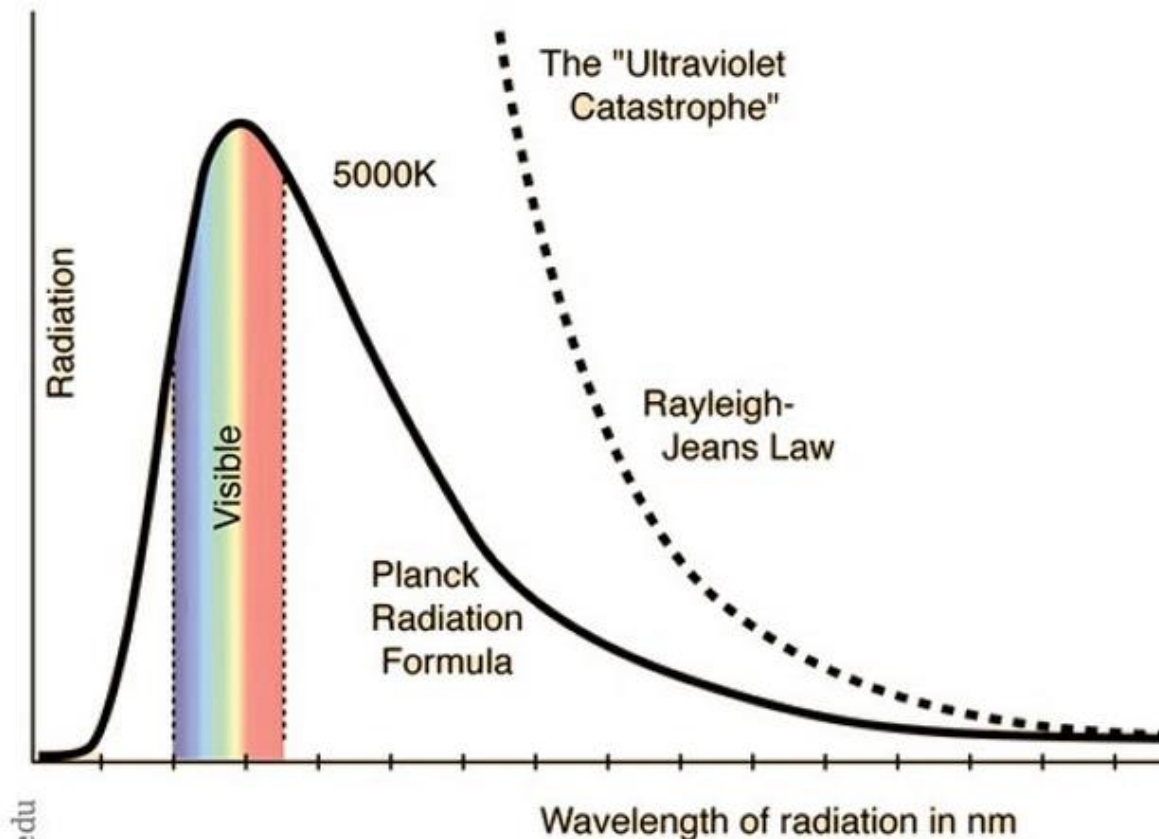
- ❑ A questão mais importante, no entanto, era saber por quais mecanismos físicos se dá a emissão de radiação.
- ❑ Do ponto de vista clássico, a emissão da radiação deveria acontecer devido à agitação térmica das cargas que compõem os átomos/moléculas do corpo à temperatura absoluta T (cargas aceleradas 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 $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} =$ constante de Boltzman

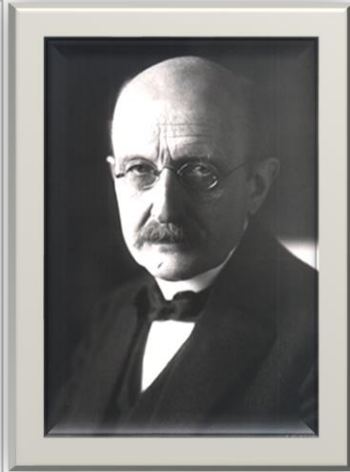
Catastrofe ultravioleta

- ❑ 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 λ . Para $\lambda \rightarrow 0$, porém, obtinha-se que $I \rightarrow \infty$!
- ❑ Este comportamento ficou conhecido com “**Catástrofe do Ultravioleta**”.



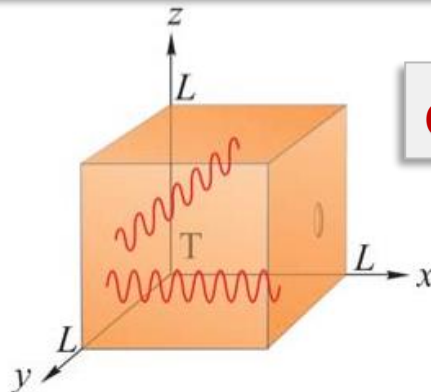
Proposta de Planck -> quantização da energia

- ❑ 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.

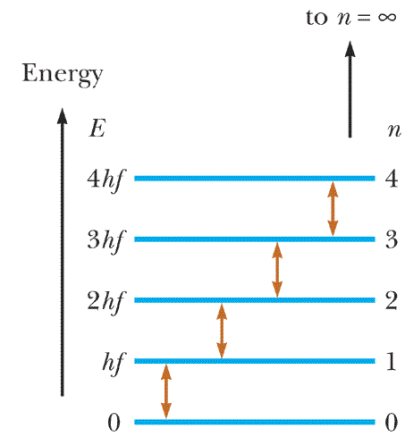


Max Planck
(1858 – 1947)

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



Quantização da energia



: Cavidade ressonante cúbica perfeitamente condutora a uma temperatura T .

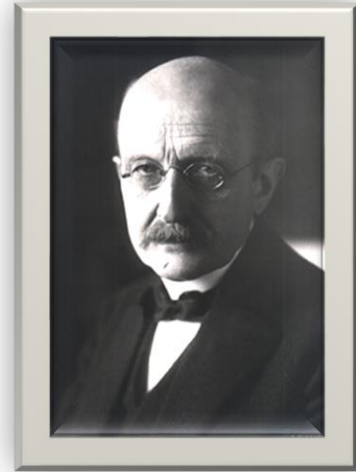
Proposta de Planck -> quantização da energia

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

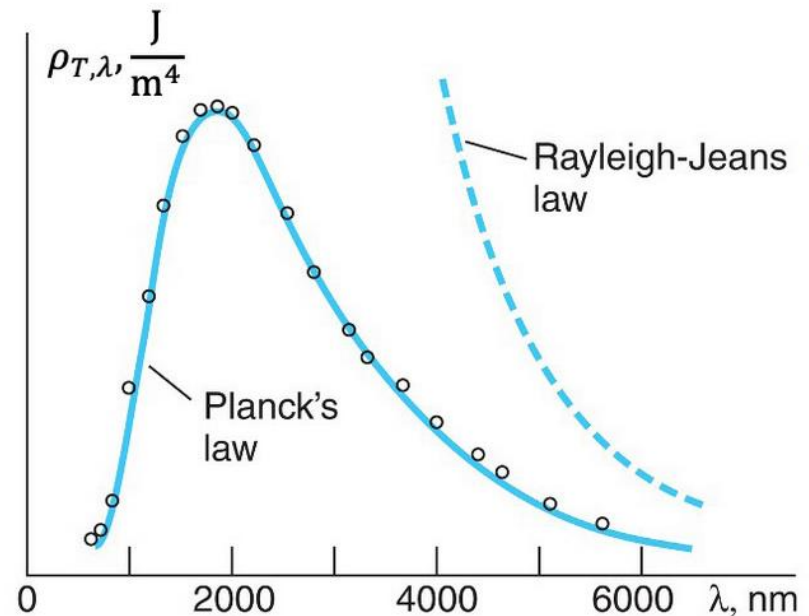
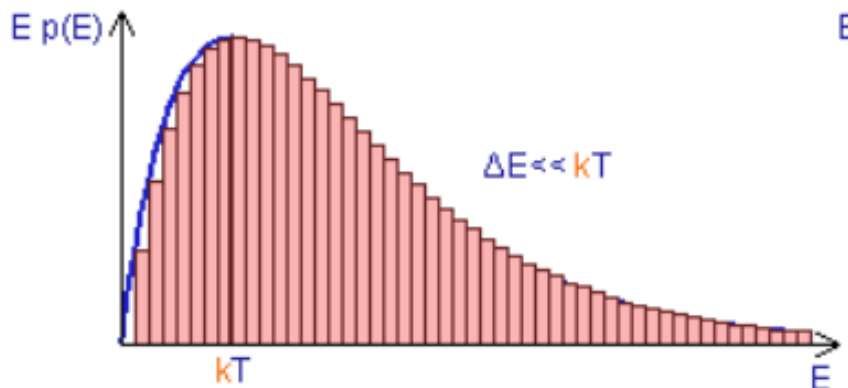
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1)}$$

A constante de normalização foi a constante “h”

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



Max Planck
(1858 – 1947)



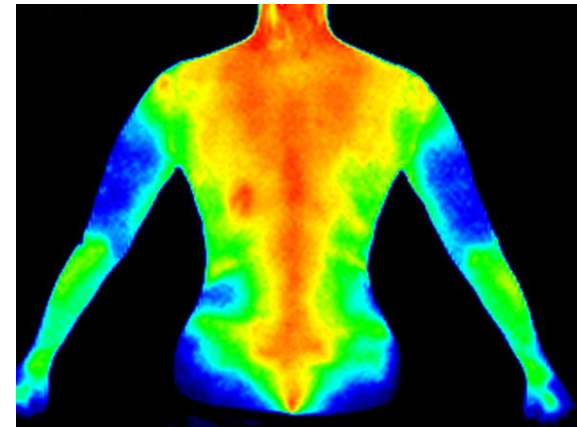
Exercício: Determine os valores máximos do comprimento de onda e frequência correspondentes à irradiação térmica emitido pelo corpo humano ($T = 35^{\circ}\text{C} = 308\text{K}$).

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 $P = 3,77 \times 10^{26} \text{ W}$.

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

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

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

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


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

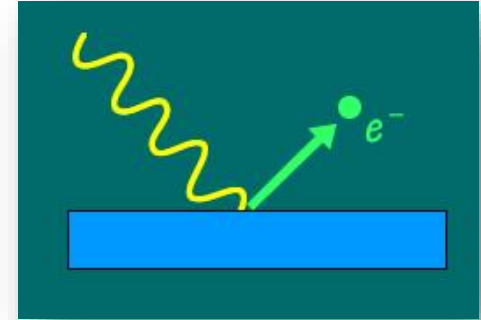
1880 a 1910: Alguns fenômenos estavam sendo observados que não conseguiam ser explicados pela mecânica clássica.

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

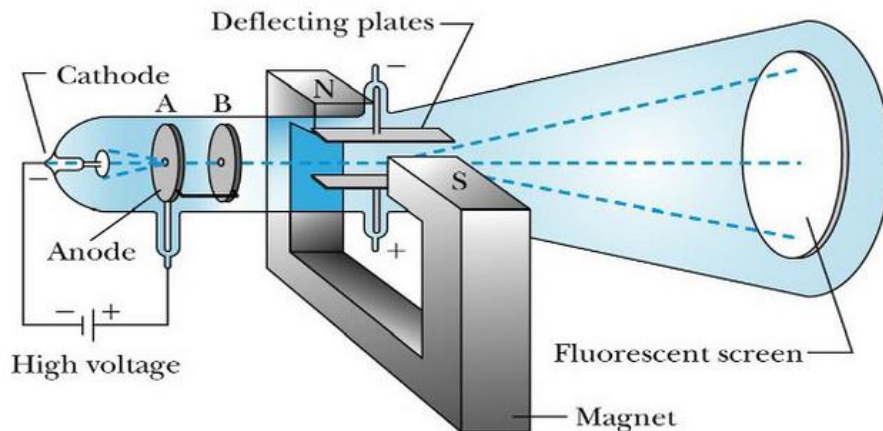
- Emissão de radiação por matéria quente
- Efeito fotoelétrico 
- Raio-x
- Espectro de linhas de átomos.

Efeito fotoelétrico

Efeito fotoelétrico: emissão de elétrons por um metal provocada pela incidência da luz



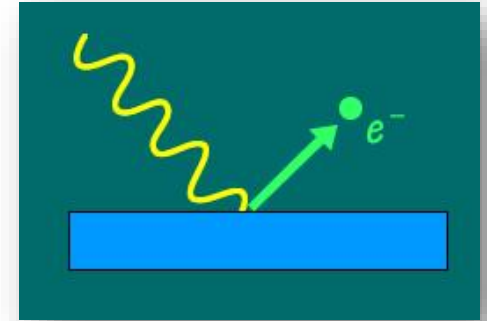
- ❑ **1887:** Foi descoberto por H. Hertz, de forma acidental ao realizar o seu experimento de geração de ondas eletromagnéticas em laboratório. Hertz percebeu que a incidência de luz ultravioleta sobre a superfície de um metal produzia descargas elétricas (centelhas)
- ❑ **1897:** Thomson descobriu que essas descargas eram constituídas de elétrons arrancados da superfície graças à energia fornecida pela luz.



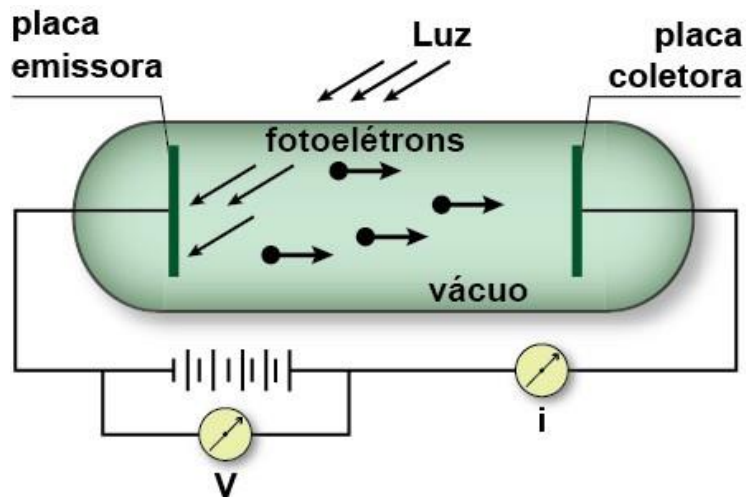
$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 R^2}$$

Efeito fotoelétrico

Efeito fotoelétrico: emissão de elétrons por um metal provocada pela incidência da luz



- ❑ **1902:** Philip Lenard mede a velocidade dos elétrons.
- ❑ **1905:** Einstein propõe uma explicação baseando-se nas ideias de fótons
- ❑ **1916:** Millikan comprova as ideias de Einstein com um experimento.
- ❑ **1921:** Einstein ganha o prêmio Nobel pela explicação do efeito fotoelétrico.



Teoria clássica do eletromagnetismo

(Maxwell 1865)

Onda Eletromagnética. Ex:

$$\vec{E} = A \hat{\epsilon} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta)$$

Vetor de Poynting:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Intensidade da onda E- M:

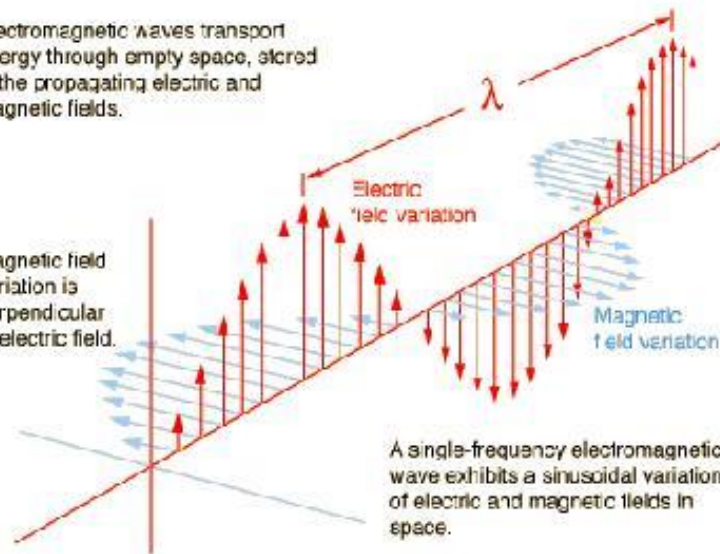
$$I = \langle \vec{S} \rangle \cdot \hat{u} = \frac{1}{2} \epsilon_0 A^2$$

$$I = \frac{\Delta U}{\Delta a \Delta t} \quad (\text{energia/área/tempo})$$

A: Amplitude do campo elétrico

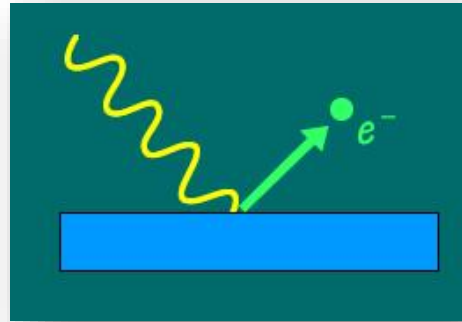
Electromagnetic waves transport energy through empty space, stored in the propagating electric and magnetic fields.

Magnetic field variation is perpendicular to electric field.



A single-frequency electromagnetic wave exhibits a sinusoidal variation of electric and magnetic fields in space.

I, ν

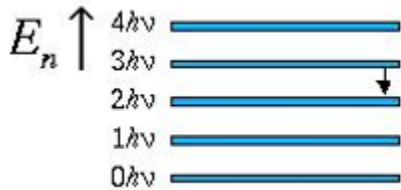


$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

	Mecânica Clássica Eletromagnetismo	Einstein
I	A energia cinética dos elétrons (E_c) deveria aumentar com a intensidade da onda eletromagnética I .	E_c não varia com a intensidade da onda I .
II	Deve haver um atraso na emissão dos elétrons, dependendo de I .	Não deve haver nenhum atraso
III	E_c não deve depender criticamente da frequência da onda eletromagnética.	Para frequências baixas não ocorre o efeito fotoelétrico.

Teoria de Einstein para o Efeito fotoelétrico

Planck (1900), quantização do osc. harmônico: $E_n = nh\nu$
 explica a radiação de corpo negro

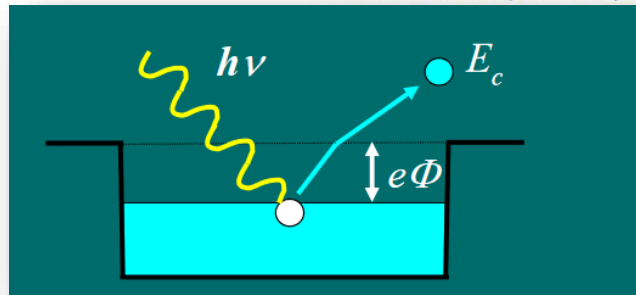


$$E_{(n+1)} - E_n = h\nu$$

h - constante de Planck
 (6.6262×10^{-34} Js)

Metal	ϕ (eV)
Na	2,28
Al	4,08
Cu	4,70
Ag	4,73
Fe	4,50

Einstein (1905), fóton: $E_f = h\nu$



Conservação de energia:

$$E_c^{max} = h\nu - e\phi$$

E_c^{max} : energia cinética máxima dos eletrons

h : constante de Planck

ν : frequência da onda incidente

e : carga do eletron

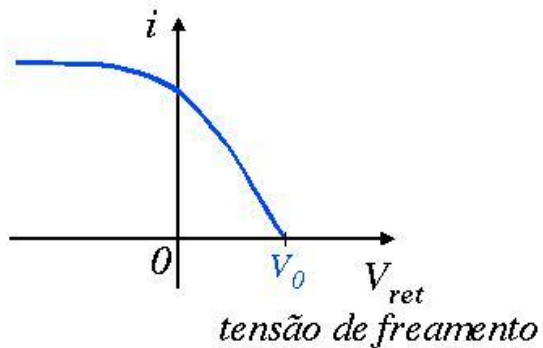
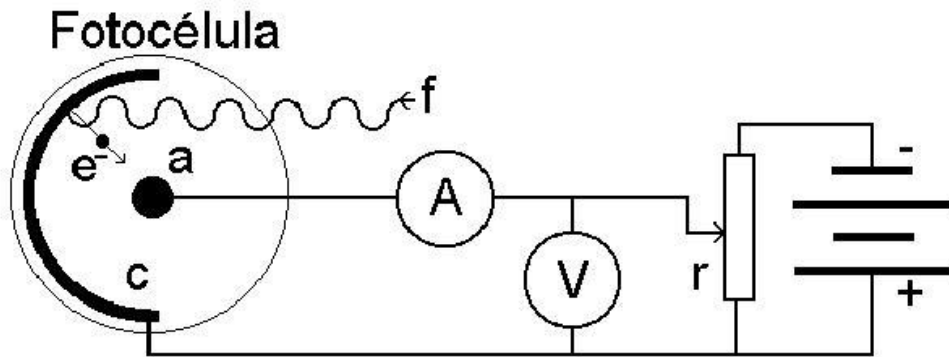
Φ : Função trabalho em volts

I – não varia com a intensidade (amplitude) ✓

II – não tem atraso ✓

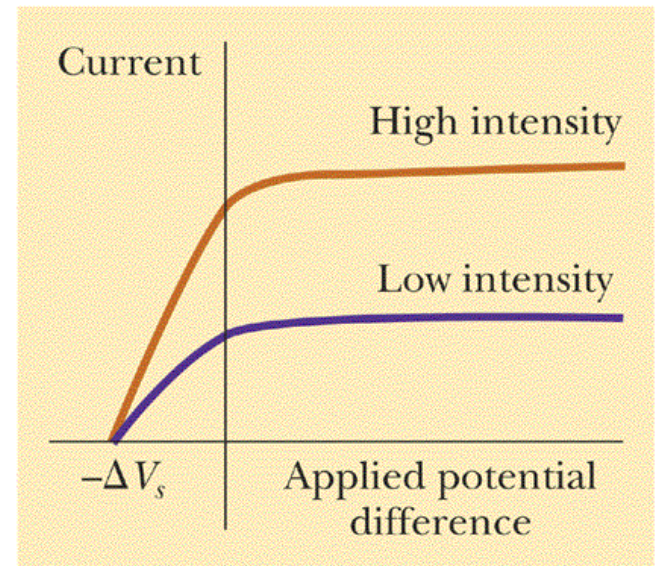
III – depende da frequencia. ✓

Medir a energia máxima dos foto-eletrons



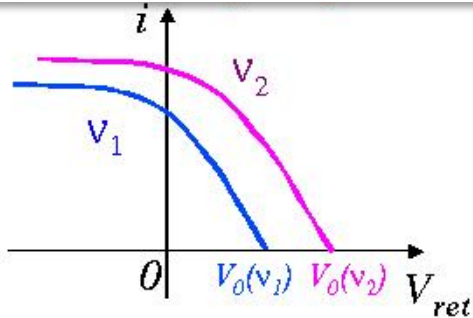
$$E_c^{max} = eV_0$$

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 28.6

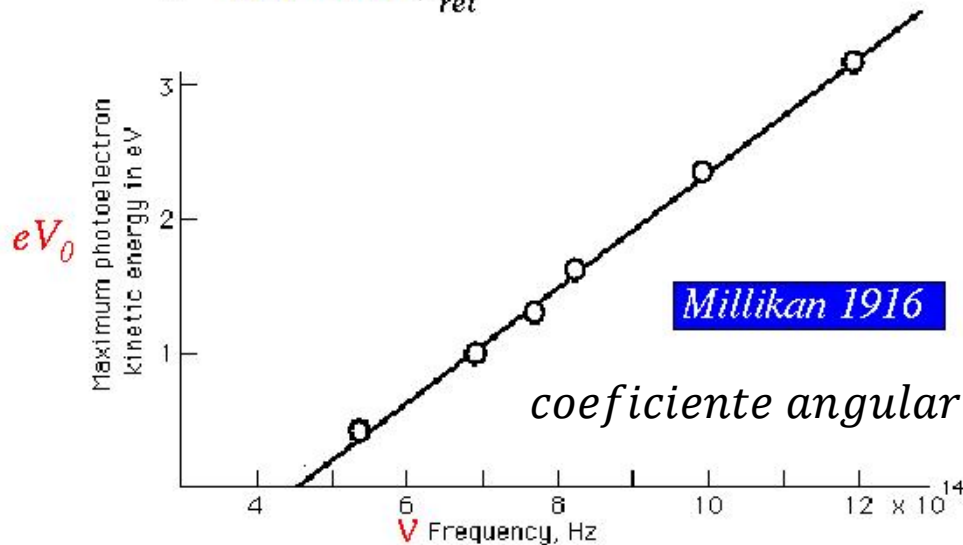


Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Experiência de Millikan e a comprovação das ideias do Einstein



$$eV_0(\nu) = h\nu - e\phi$$

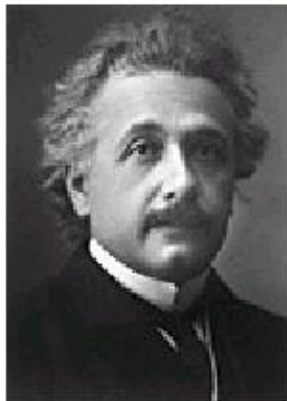


$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$



Efeito fotoelétrico

<http://www.nobel.se/physics/laureates/>



Prêmio Nobel de Física 1921

"pelos seus serviços para a Física Teórica, e especialmente pela sua descoberta da lei do **efeito fotoelétrico**"

Albert Einstein

(1879- 1955)



Prêmio Nobel de Física 1923

"pelo seu trabalho sobre a carga elementar e sobre o **efeito fotoelétrico**"

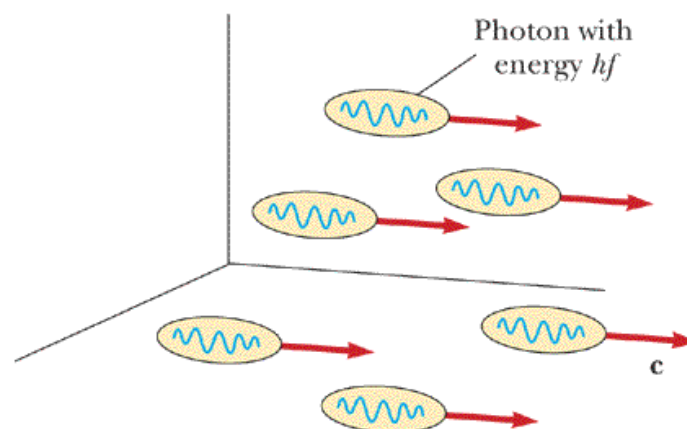
Robert Andrews Millikan

(1868- 1953)

- ❑ Einstein propõe a ideia do Fóton
- ❑ A lei de Planck relaciona a energia do fóton com seu comprimento de onda ou frequência.


- ❑ E = energia do fóton
- ❑ h = constante de Planck = 6.625×10^{-34} J.s
- ❑ c = velocidade da luz
- ❑ λ = comprimento de onda

$$E = hf$$



- ❑ Exemplo: 633-nm fóton na frequência do vermelho
- ❑ $E = 3.14 \times 10^{-19}$ J ou $E = 1.96$ eV
- ❑ 1eV: eletron volts = 1.602×10^{-19} J

nd derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.



Exemplo: Uma placa de sódio é iluminada com radiação de comprimento de onda $\lambda = 300\text{nm}$. Sabendo-se que a função-trabalho é $2,28\text{ eV}$, determine:

- a) A energia cinética máxima dos fotoelétrons
- b) O comprimento de onda limiar (λ_c) para o sódio
- c) A velocidade máxima dos fotoelétrons

