

# Introdução a Física Moderna A

Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR  
Departamento Acadêmico de Física de Ji-Paraná - DAF-JP

# Unidade III - Propriedades corpusculares da radiação

- ❑ Radiação de corpo negro e a Teoria de Planck
- ❑ Efeito fotoelétrico
- ❑ Efeito Compton
- ❑ Produção de raios X
- ❑ Modelo de Rutherford

# Radiação de corpo negro e a teoria de M. Planck

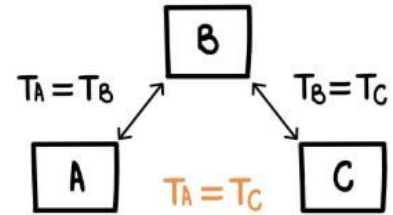


# Radiação Térmica

A radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura é chamada de *radiação térmica*.



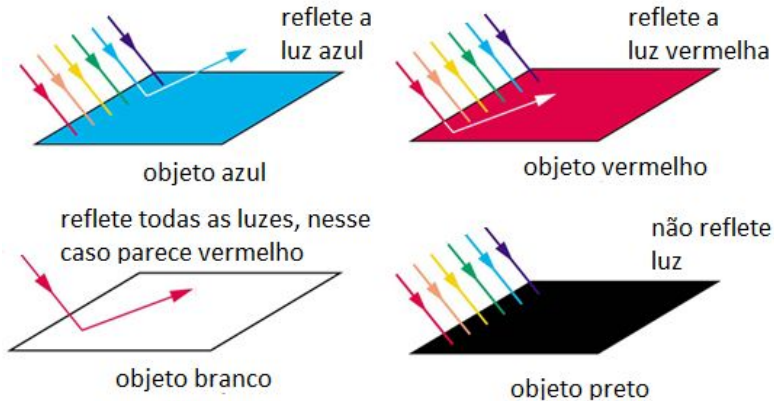
## LEI ZERO



No equilíbrio, as taxas de emissão e absorção são iguais.

# Radiação Térmica

Em temperaturas “usuais”, a maioria dos corpos são visíveis não pela luz que emitem, mas sim pela radiação que refletem.



# Radiação Térmica

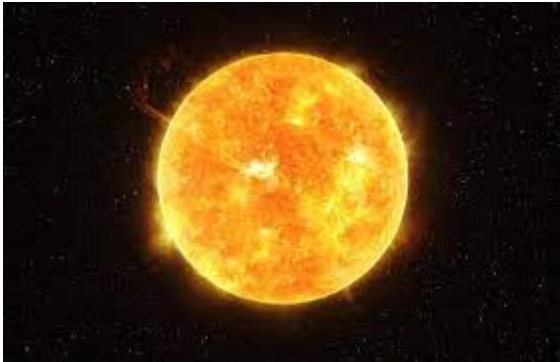
Em temperaturas “usuais”, a maioria dos corpos são visíveis não pela luz que emitem, mas sim pela radiação que refletem.

**Contudo, sem Luz, não os poderíamos ver.**



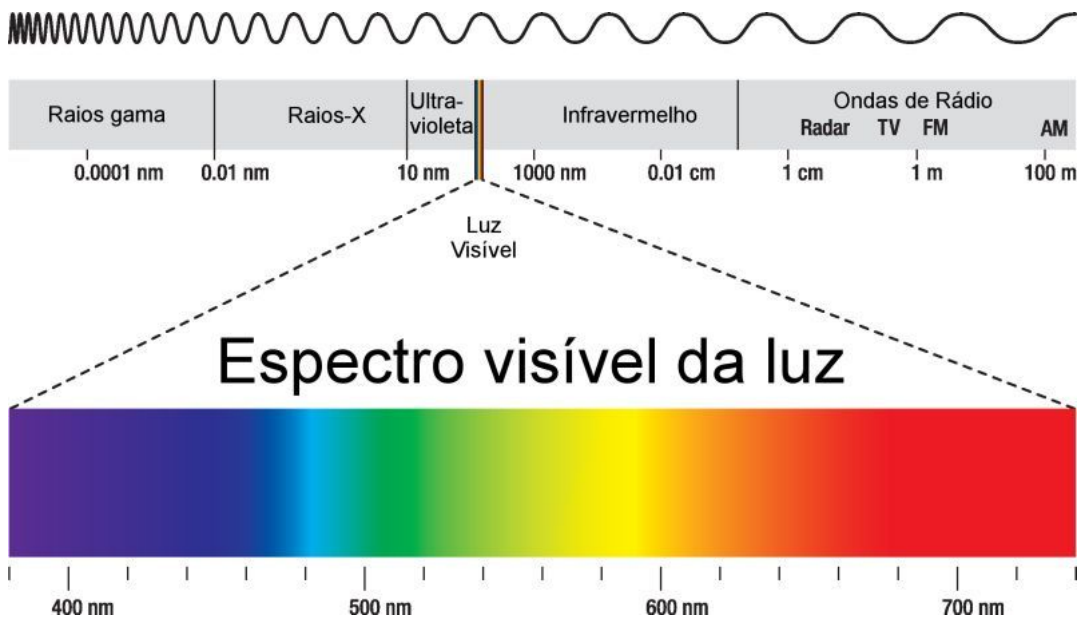
# Radiação Térmica

Mas, se a temperatura for muito alta, corpos podem emitir luz própria.



# Radiação Térmica

Mas saiba, mais de 90% da radiação térmica emitida é invisível para nós, estando na região do infravermelho do espectro eletromagnético.



Corpos com luz própria são muito quentes.



# Radiação de corpo negro

O que percebemos é a existência de uma relação:

**Frequência x temperatura**

- ❑ Cada corpo tem sua composição;
- ❑ Cada corpo emite radiação de acordo com sua composição;

# Radiação de corpo negro

O que percebemos é a existência de uma relação:

frequência x temperatura

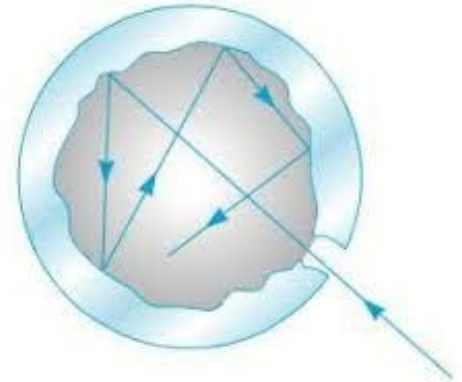
- ❑ Corpos que emitem ou absorvem toda a radiação (incidente) sobre ele são chamados de *Corpo Negro*;
- ❑ Corpo negro está associado a um corpo que não emite (refletem) luz, portanto não pode ser visto.

# Radiação de corpo negro

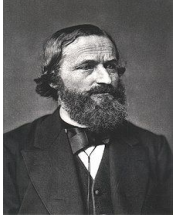
O que percebemos é a existência de uma relação:

**frequência x temperatura**

- ❑ Cada corpo tem sua composição;
- ❑ Cada corpo emite radiação de acordo com sua composição;
- ❑ Corpos que emitem ou absorvem toda a radiação (incidente) sobre ele são chamados de *Corpo Negro*;
- ❑ Corpo negro está associado a um corpo que não emite (reflete) luz, portanto não pode ser visto.

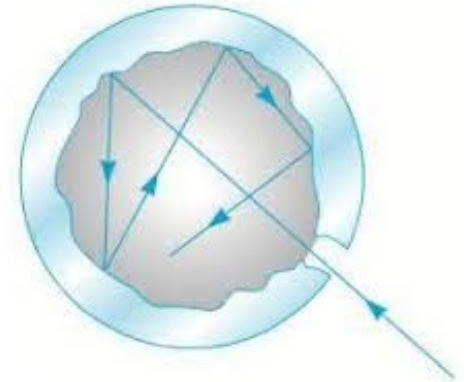


# Radiação de corpo negro

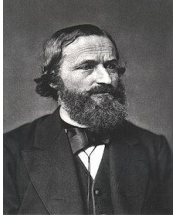


Kirchhoff idealizou o conceito de **corpo negro**;

Em 1882 concluiu que todos os corpos que são bons emissores de radiação, são também bons absorvedores;



# Radiação de corpo negro



Idealizou o conceito de corpo negro;

Em 1882 concluiu que todos os corpos que são bons emissores de radiação, são também bons absorvedores;

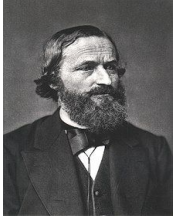


Josef Stefan realizou experimentos de radiação de corpo negro a partir de 1884;

Estabeleceu que a energia irradiada era proporcional à temperatura absoluta do corpo. **Lei de Stefan.**

$$U \propto T^4$$

# Radiação de corpo negro



Idealizou o conceito de corpo negro;

Em 1882 concluiu que todos os corpos que são bons emissores de radiação, são também bons absorvedores;



Josef Stefan realizou experimentos de radiação de corpo a partir de 1884;

Estabeleceu que a energia irradiada era proporcional à temperatura absoluta do corpo. Lei de Stefan.

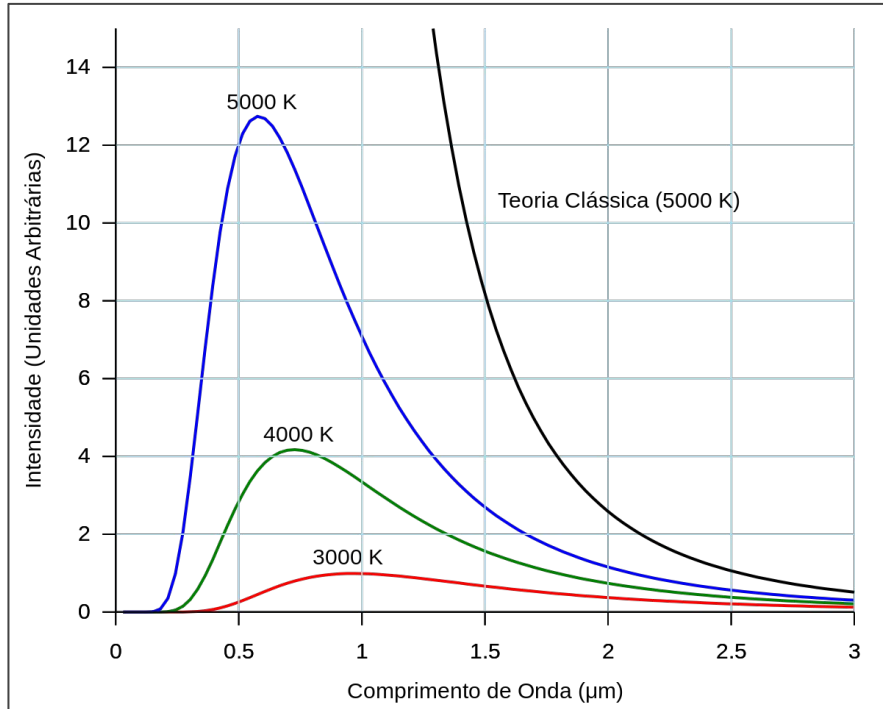


Ludwig Boltzmann mostrou que a proporcionalidade da lei de Stefan estava associada a uma constante. A equação definida passa a ser conhecida como **lei de Stefan-Boltzmann**.

$$I(T) = \sigma T^4$$

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

# Radiação de corpo negro

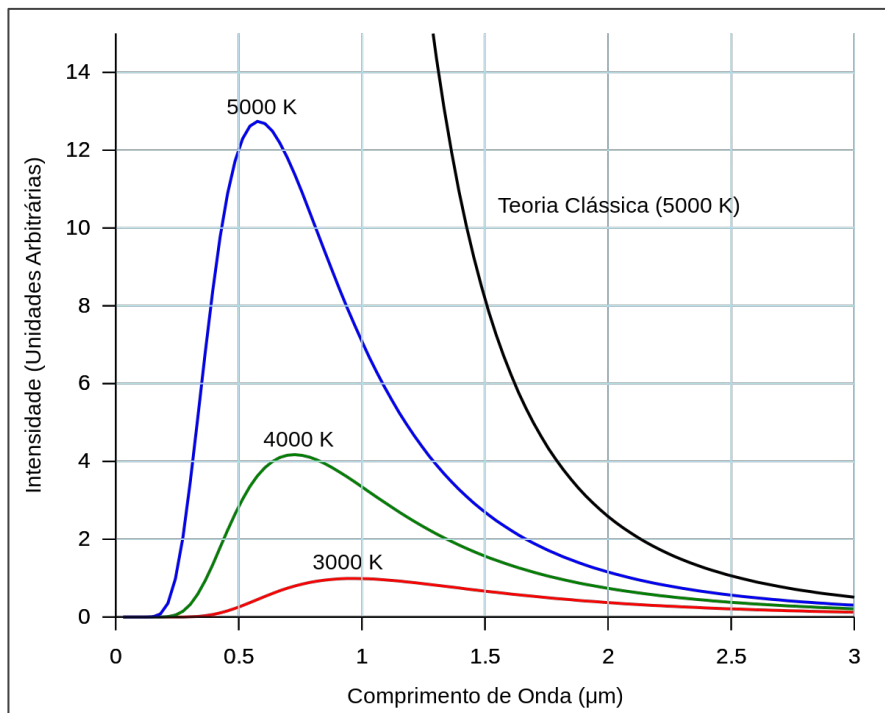


$$I(T) = \sigma T^4$$

Conhecida as características da radiação de negro, tinha-se que estabelecer uma correlação entre dados experimentais e teóricos.

Até aquele momento, dados teóricos não batiam com dados experimentais.

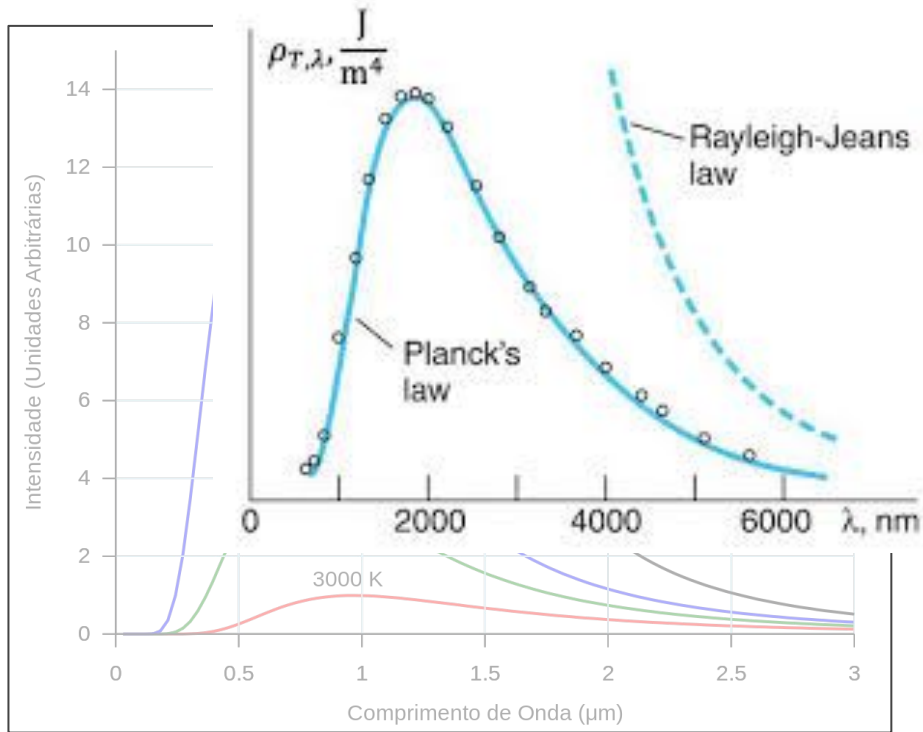
# Radiação de corpo negro



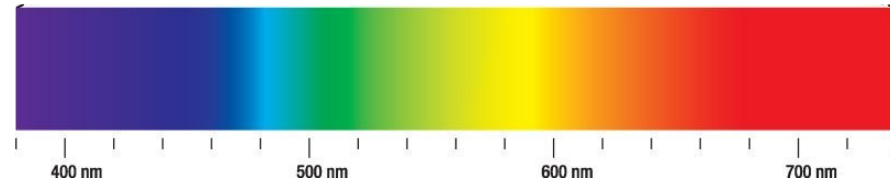
- **Em preto** a teoria clássica apresentada por Rayleigh-Jeans. Para valores grandes de frequência, e energia tenderia ao infinito;
- **Em cores**, os resultados observados e coerentes com a realidade.



# Radiação de corpo negro



- A teoria clássica apresentada por Rayleigh-Jeans, logo ficou conhecido como Catástrofe do Ultravioleta.



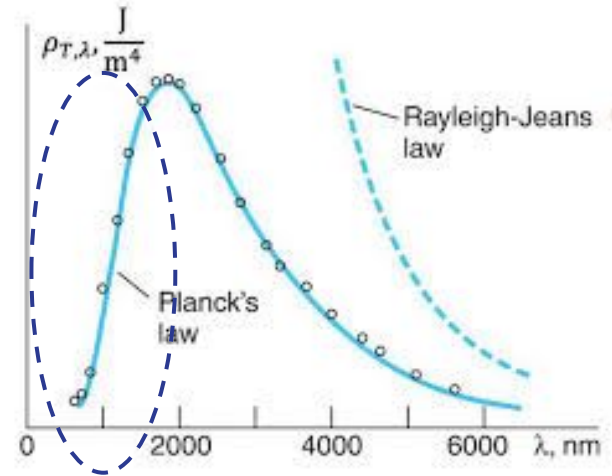
# Quantização da energia

Conhecida as características da radiação de negro e a discrepância da catástrofe do ultravioleta:

## Teorias foram propostas:

- A primeira é de 1893, do físico Wilhelm Wien (Lei do deslocamento de Wien ou Lei de Wien), explicava o comportamento dos resultados no regime de altas frequências;

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



$$b = 2,897 \times 10^{-3} m.K$$

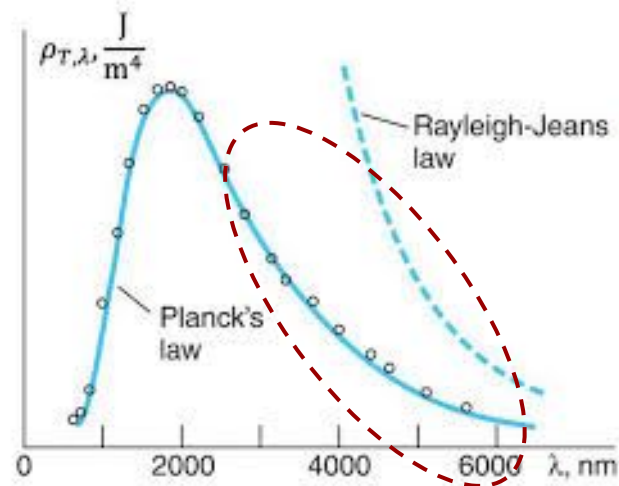
# Quantização da energia

Conhecida as características da radiação de negro e a discrepância da catástrofe do ultravioleta:

## Teorias foram propostas:

- A primeira é de 1893, do físico Wilhelm Wien, que explicava o comportamento dos resultados no regime de altas frequências;
- A segunda é de 1900, atribuída a John William Strutt (Lord Rayleigh) e James Jeans, que descrevia o comportamento experimental à região de altas frequências;

$$I(f, T) = \frac{8\pi \cdot f^2}{c^3} \cdot K_B T$$



# Radiação de corpo negro

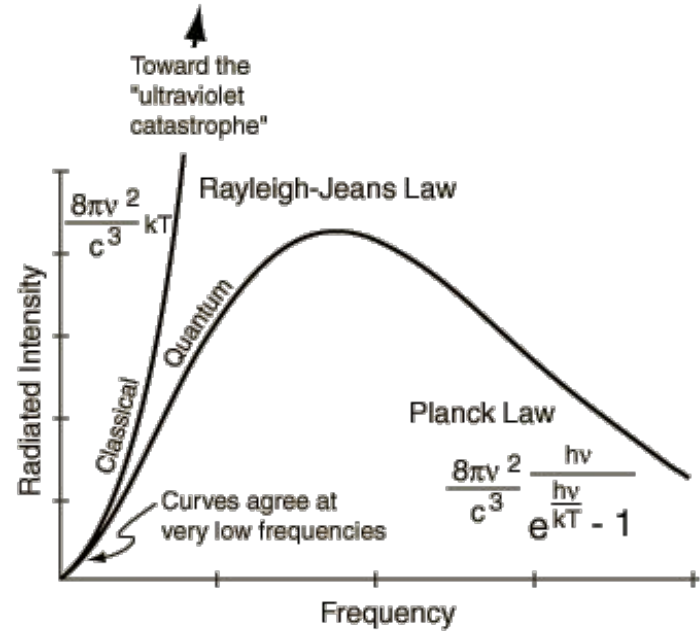
Resumidamente, sobre o radiação de Corpo Negro temos (classicamente):

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

(Lei de Wien)

$$I(f, T) = \frac{8\pi \cdot f^2}{c^3} \cdot K_B T$$

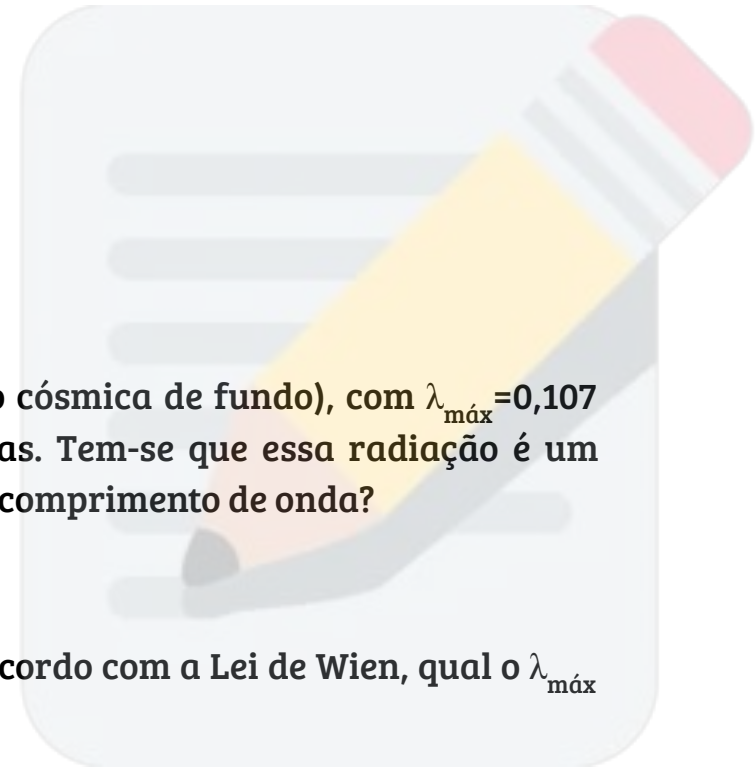
(Lei de Rayleigh-Jeans)



# Radiação de corpo negro

Sobre Radiação de Corpo Negro, responda:

- 1) Em 1965, radiação de microondas (batizada como radiação cósmica de fundo), com  $\lambda_{\text{máx}} = 0,107$  cm, vinda de todas as direções do espaço foram detectadas. Tem-se que essa radiação é um resíduo da era do **Big-bang**. Qual o valor corresponde a esse comprimento de onda?
- 2) Sendo a Temperatura na superfície do Sol de  $T = 5800$  K. De acordo com a Lei de Wien, qual o  $\lambda_{\text{máx}}$  emitido pelo Sol a essa Temperatura?



# Radiação de corpo negro

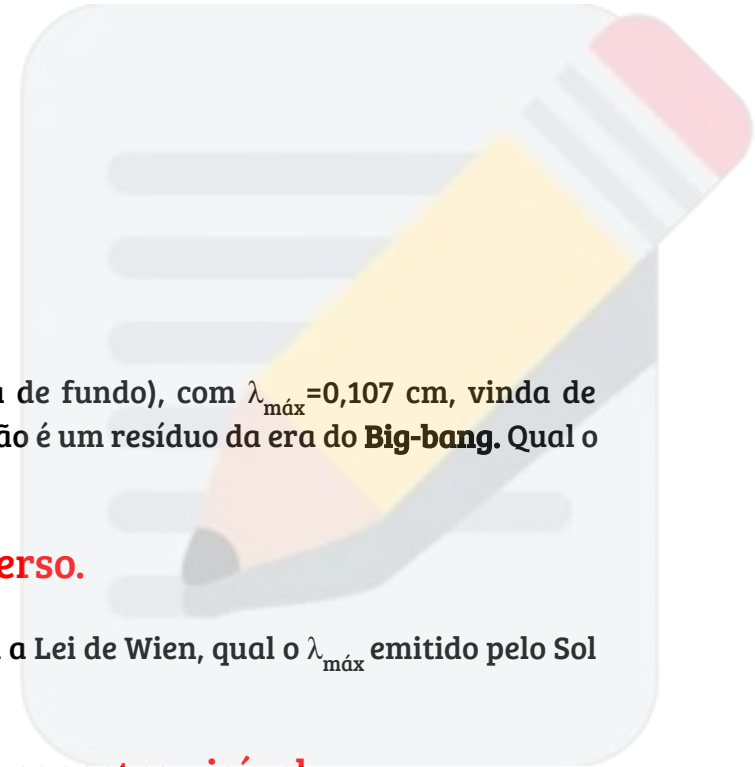
Sobre Radiação de Corpo Negro, responda:

- 1) Em 1965, radiação de microondas (batizada como radiação cósmica de fundo), com  $\lambda_{\text{máx}}=0,107 \text{ cm}$ , vinda de todas as direções do espaço foram detectadas. Tem-se que essa radiação é um resíduo da era do **Big-bang**. Qual o valor corresponde a esse comprimento de onda?

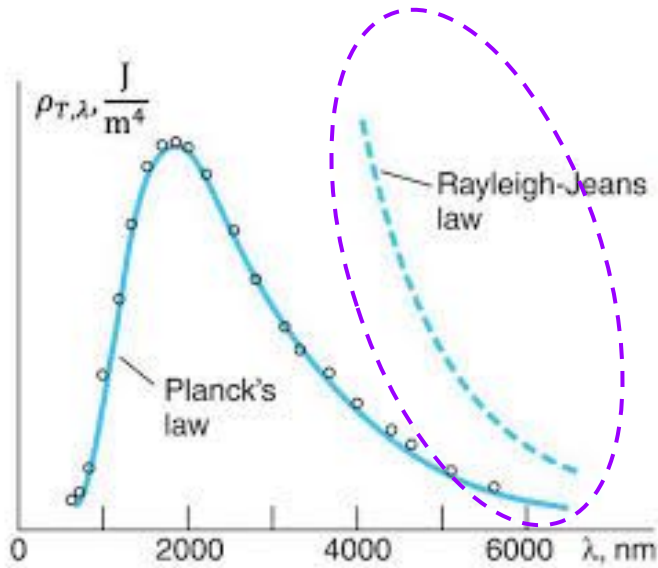
**R: 2,71 K. O que equivale à temperatura atual do universo.**

- 2) Sendo a Temperatura na superfície do Sol de  $T=5800 \text{ K}$ . De acordo com a Lei de Wien, qual o  $\lambda_{\text{máx}}$  emitido pelo Sol a essa Temperatura?

**R: ~603 nm. O que equivale à região do alaranjado no espectro visível.**



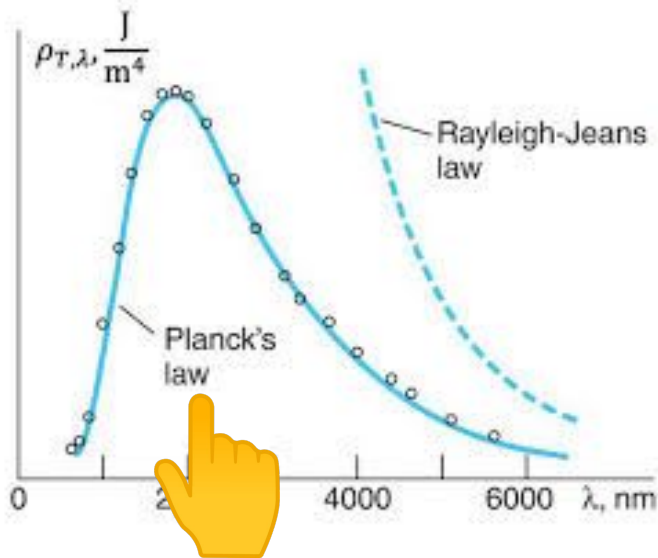
# Radiação de corpo negro e a teoria de Planck



A catástrofe do ultravioleta era o problema. Mas obedecia às leis clássicas da Física.

$$I(f, T) = \frac{8\pi \cdot f^2}{c^3} \cdot K_B T$$

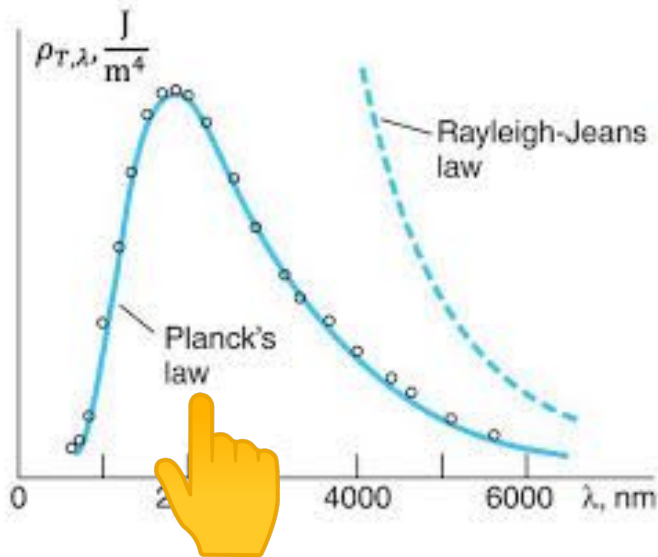
# Radiação de corpo negro e a teoria de Planck



Ainda em 1900, Max Karl Ernst Ludwig **Planck**, ao apresentar uma solução que descartava o princípio de continuidade da radiação, assumindo que a luz era de natureza corpuscular, introduziu nas equações de Rayleigh-Jeans uma constante.



# Radiação de corpo negro e a teoria de Planck



$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (\text{Lei de Planck/Corpo Negro})$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (\text{Constante de Planck})$$



**“ [Postulado] A radiação de corpo negro deveria ser emitida na forma de “minúsculos pacotes”, ou quanta de energia. ”**



## Radiação de corpo negro e a teoria de Planck

Ao assumir essa resposta (corretamente), Planck assume que a radiação eletromagnética é formada por um número inteiro de pacotes de energia  $hf$ , tal que a energia total é dada por

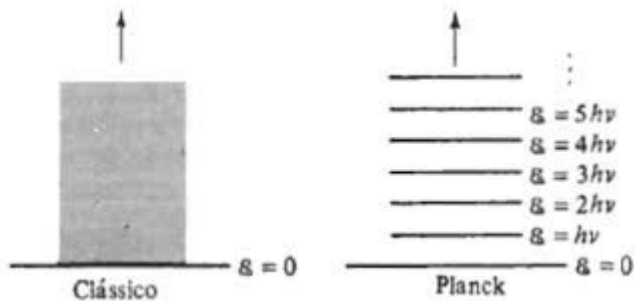
$$E = nhf$$

$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

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

# Radiação de corpo negro e a teoria de Planck

$$E = nhf$$



Resumindo:

$$I(f, T) = \frac{8\pi \cdot f^2}{c^3} \cdot K_B T$$

Energia contínua - catástrofe do ultravioleta

$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

Energia quantizada - ajuste perfeito

# Radiação de corpo negro e a teoria de Planck

## Resumo

$$I(T) = \sigma T^4$$

Lei Stefan-Boltzmann

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

Lei de Wien

$$I(f, T) = \frac{8\pi \cdot f^2}{c^3} \cdot K_B T$$

Rayleigh-Jeans/catástrofe do ultravioleta

$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

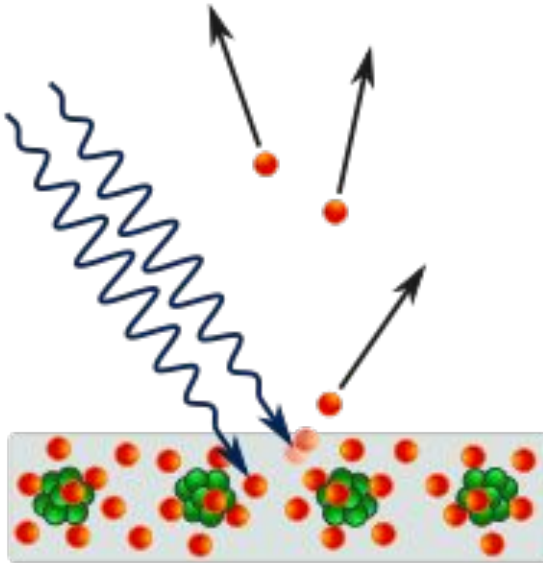
Ajuste de Planck

$$E = nhf$$

Postulado de Planck

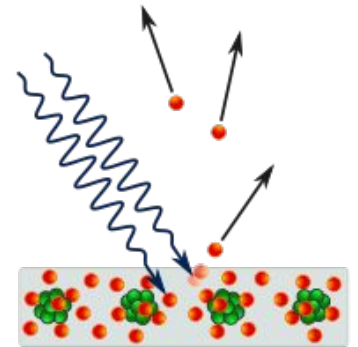
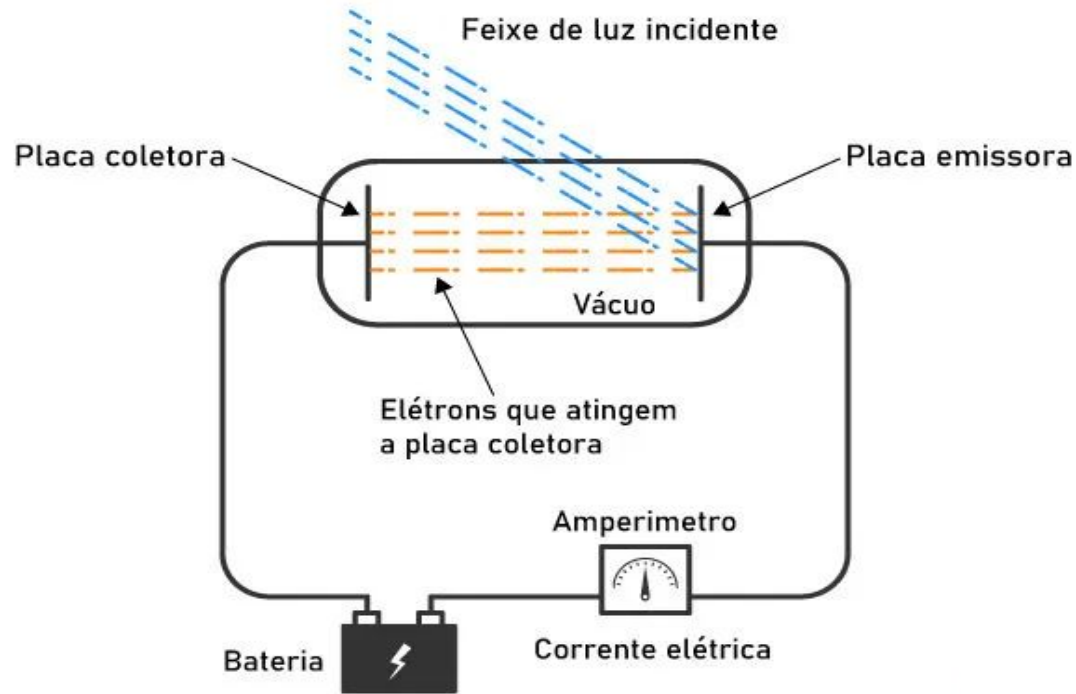
# O efeito fotoelétrico

## O efeito fotoelétrico



O **efeito fotoelétrico** é a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética (como a luz) de frequência suficientemente alta. Ele pode ser observado quando a luz incide numa placa de metal, arrancando elétrons da placa.

# O efeito fotoelétrico





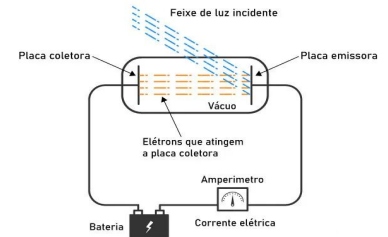
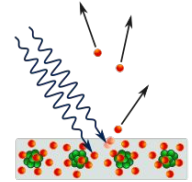
# O efeito fotoelétrico

## No efeito fotoelétrico:

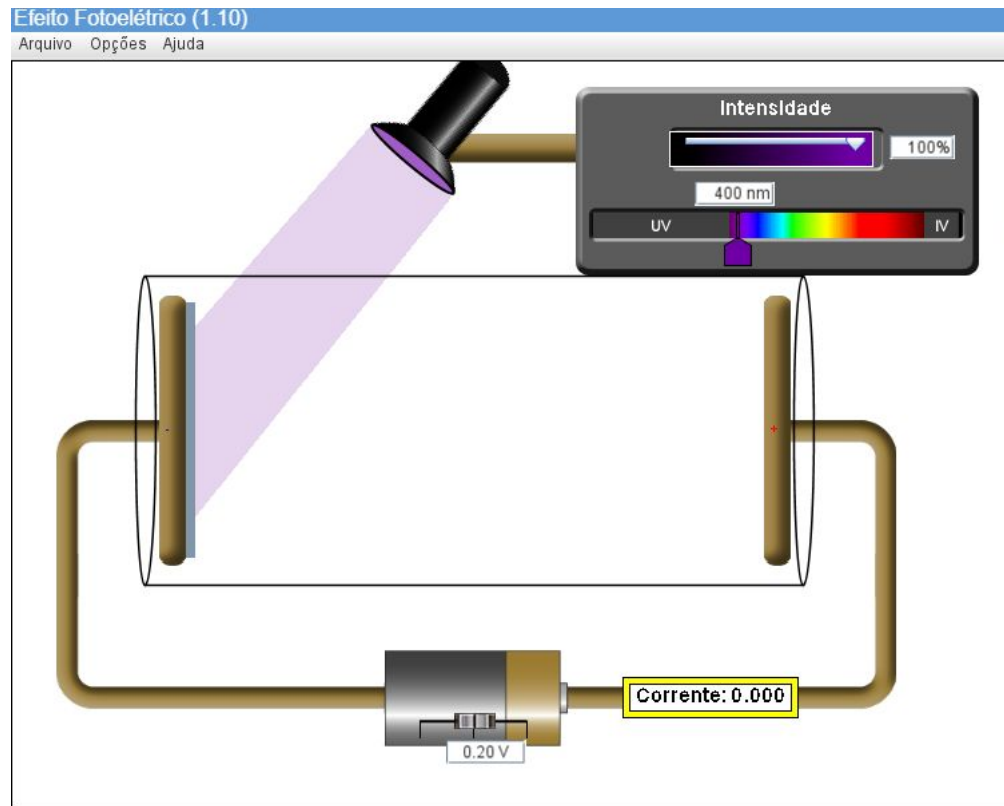
A radiação (luz) é monocromática (geralmente de alta frequência);

A ejeção de elétrons depende do material (potencial de corte);

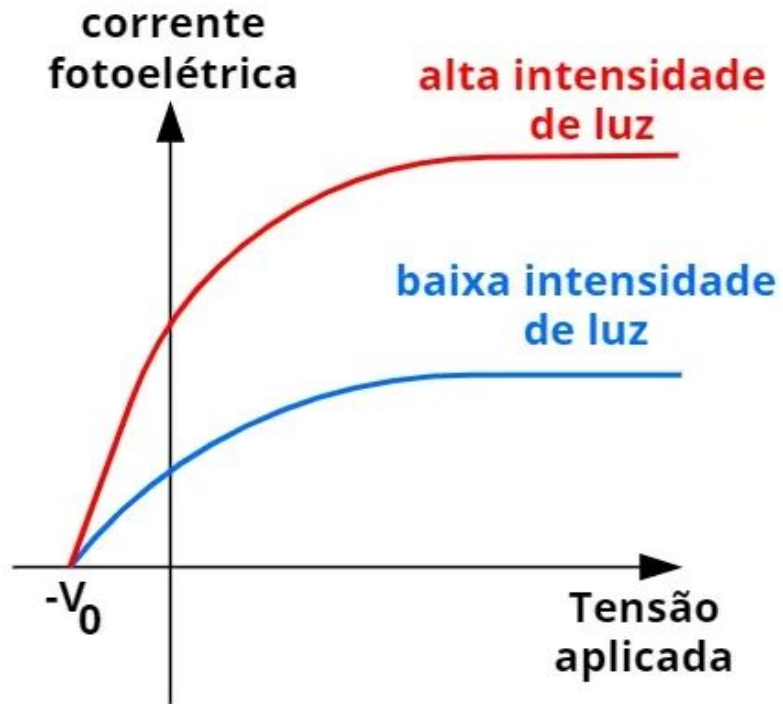
Para ejeção de elétrons é preciso conhecer a frequência de corte;



# O efeito fotoelétrico

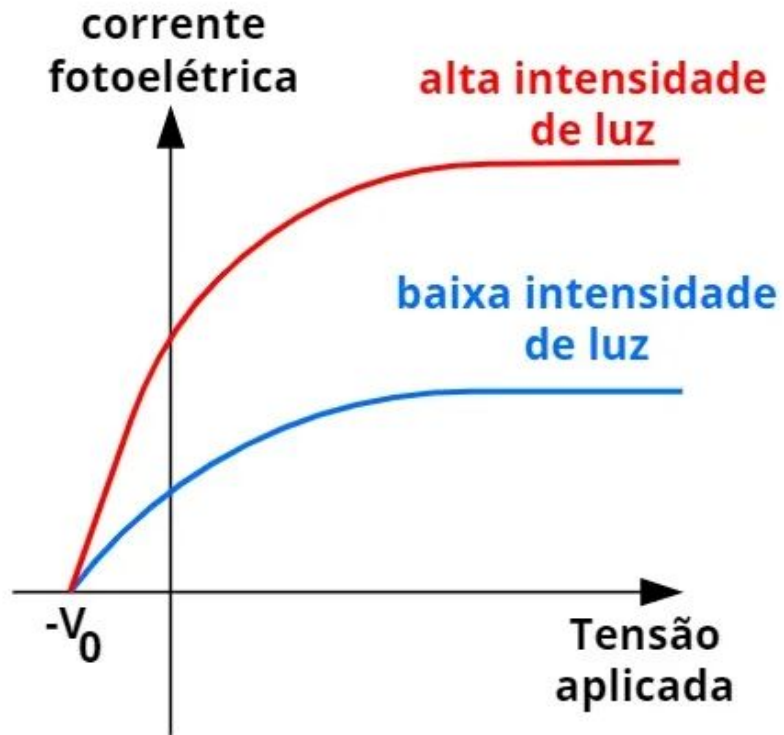


# O efeito fotoelétrico



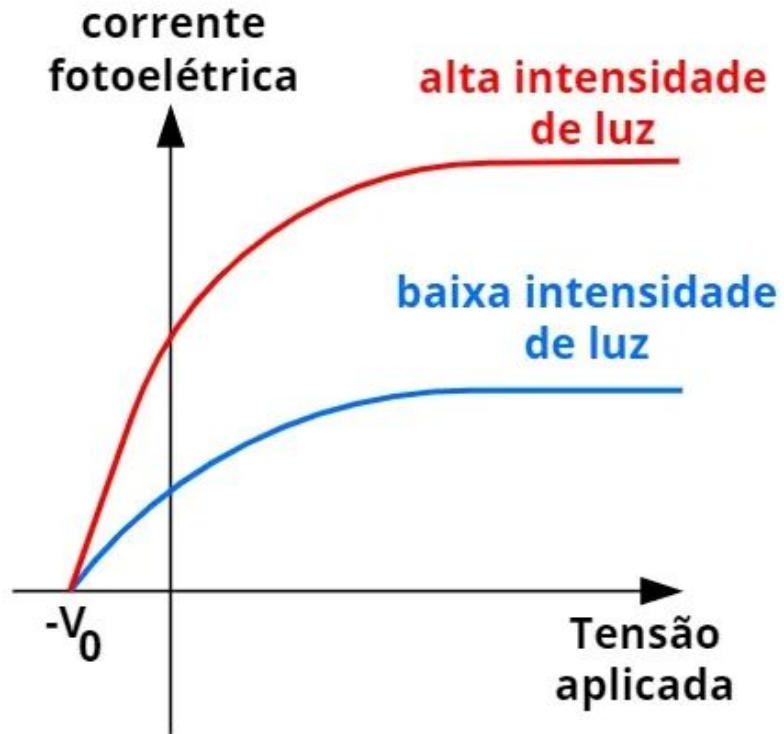
- ☐ Correntes de deslocamento  $I_b > I_a$ ;
- ☐

# O efeito fotoelétrico



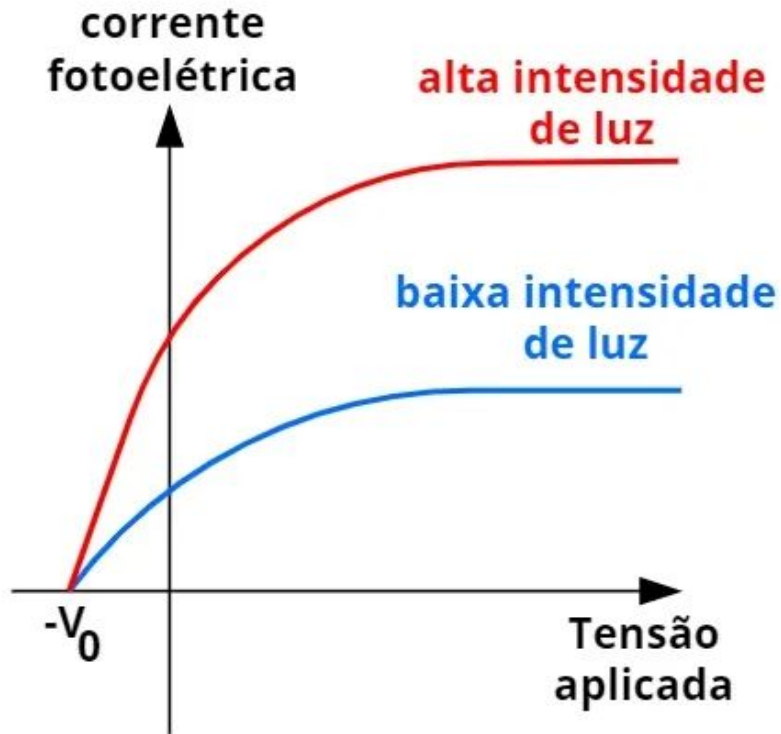
- ❑ Correntes de deslocamento  $I_b > I_a$ ;
- ❑ Existe corrente se  $V > 0$ ;
- ❑

# O efeito fotoelétrico



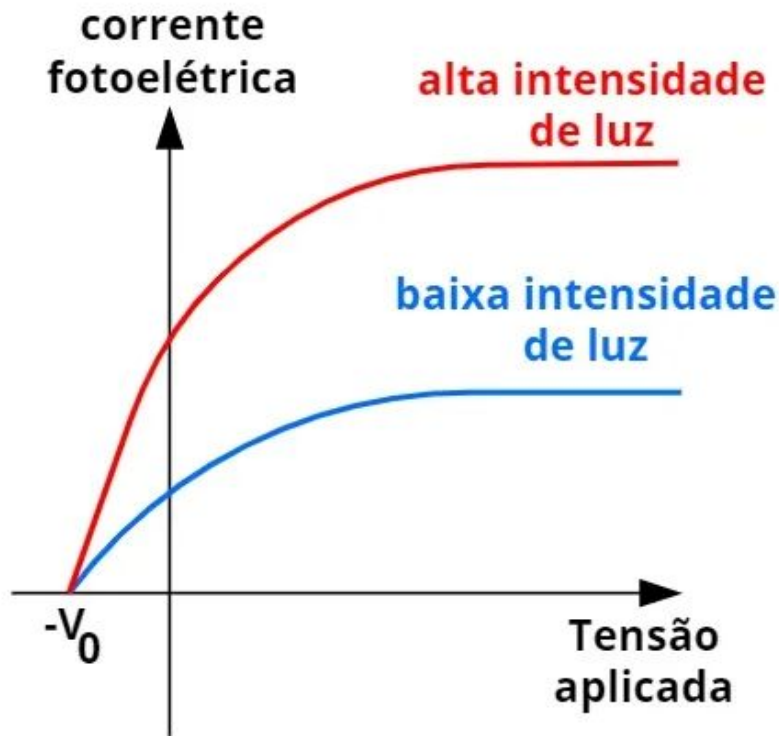
- ❑ Correntes de deslocamento  $I_b > I_a$ ;
- ❑ Existe corrente se  $V > 0$ ;
- ❑  $V_0$  é chamado de potencial de corte;
- ❑

# O efeito fotoelétrico



- ❑ Correntes de deslocamento  $I_b > I_a$ ;
- ❑ Existe corrente se  $V > 0$ ;
- ❑  $V_0$  é chamado de potencial de corte;
- ❑ Elétrons ejetados tem energia  $K_m = eV_0$ ;
- ❑

# O efeito fotoelétrico

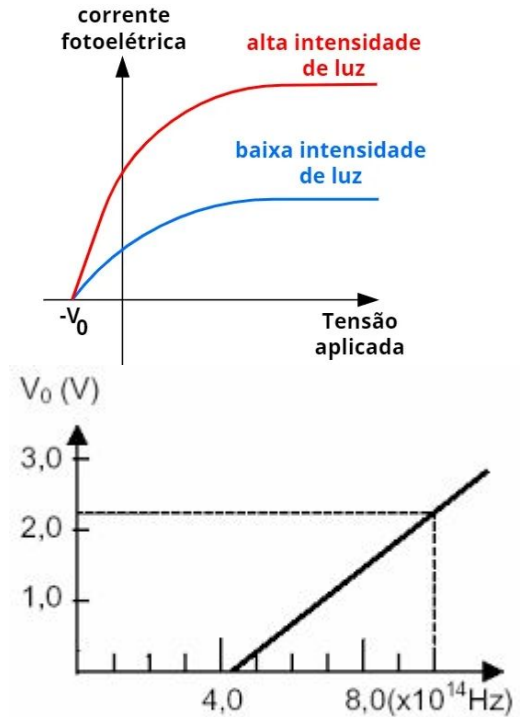


- ❑ Correntes de deslocamento  $I_b > I_a$ ;
- ❑ Existe corrente se  $V > 0$ ;
- ❑  $V_0$  é chamado de potencial de corte;
- ❑ Elétrons ejetados tem energia  $K_m = eV_0$ ;
- ❑ A ejeção de fotoeletróns do metal é analisada através de  $K_m = E - \Phi$ ;

# O efeito fotoelétrico

## Problemas clássicos

- ❑ A não dependência de  $V_0$  com a intensidade da luz;
- ❑ A existência de uma frequência de corte ( $f_0$ );
- ❑ O tempo entre a absorção da energia e a expulsão do fotoelétron.

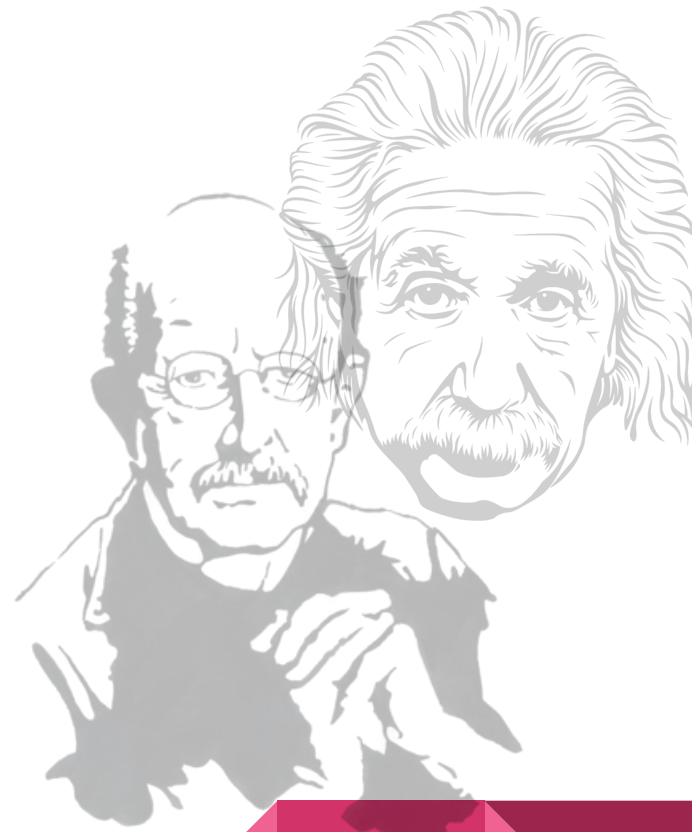




# O efeito fotoelétrico

## A Solução

**Em 1905 Einstein propôs que a radiação do efeito fotoelétrico fosse quantizada, como já havia feito para radiação de corpo negro anos antes, assumindo:**

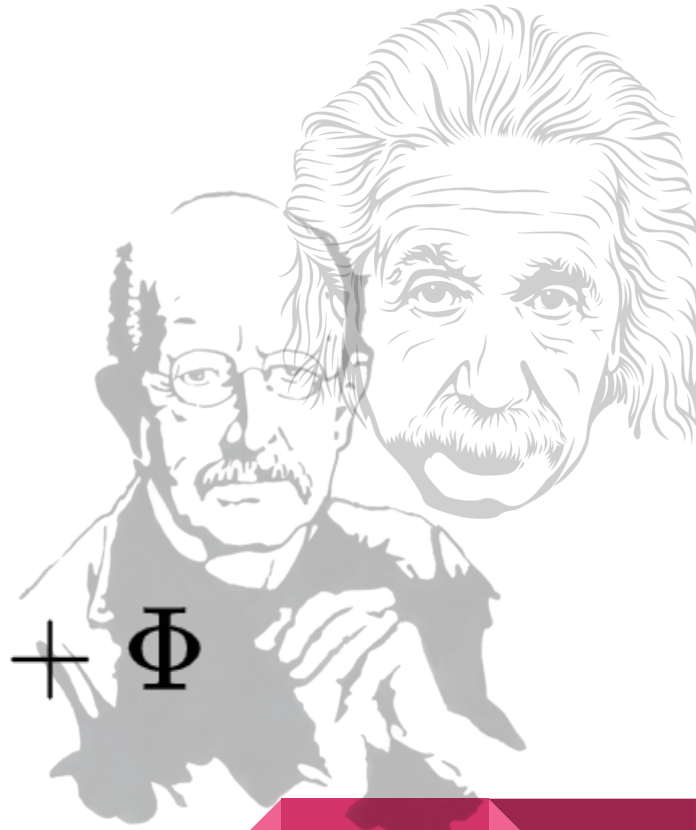


## O efeito fotoelétrico

$$E = K_m + \Phi$$



$$hf = K_m + \Phi$$



## O efeito fotoelétrico

$$hf = K_m + \Phi$$

1. A expressão exclui o sentido de continuidade ondulatória da luz;
2. Admite que a luz é composta por pacotes (quantas) de energia;
3. Nesse caso, foram chamados de fóton, a partícula da luz.

