

# Radiação de Corpo Negro, Efeito Fotoelétrico e Dualidade Onda-Partícula

UNASAL/PAC



# Corpo Negro

→ Absorve *toda* a radiação sobre ele incidente.  
(portanto, seria visto como *negro*)

## Corpo Negro

→ Absorve *toda* a radiação sobre ele incidente.  
(portanto, seria visto como *negro*)

→ Tem certa temperatura  $T$ , portanto emite também radiação térmica  
(eletromagnética).

# Corpo Negro

→ Absorve *toda* a radiação sobre ele incidente.  
(portanto, seria visto como *negro*)

→ Tem certa temperatura  $T$ , portanto emite também radiação térmica  
(eletromagnética).

Em 1859, Kirchhoff propôs:

*“Para um corpo arbitrário emitindo radiação térmica, a razão  $E/A$  entre a radiância espectral emissiva,  $E$ , e o fator de absorção adimensional,  $A$ , é a mesma para todos os corpos a uma dada temperatura. A razão  $E/A$  é igual à radiância espectral emissiva  $I$  de um corpo negro perfeito que é uma função apenas de comprimento de onda e de temperatura.”*

# Corpo Negro

→ Absorve *toda* a radiação sobre ele incidente.  
(portanto, seria visto como *negro*)

→ Tem certa temperatura  $T$ , portanto emite também radiação térmica  
(eletromagnética).

Em 1859, Kirchhoff propôs:

*“Para um corpo arbitrário emitindo radiação térmica, a razão  $E/A$  entre a radiância espectral emissiva,  $E$ , e o fator de absorção adimensional,  $A$ , é a mesma para todos os corpos a uma dada temperatura. A razão  $E/A$  é igual à radiância espectral emissiva  $I$  de um corpo negro perfeito que é uma função apenas de comprimento de onda e de temperatura.”*

Ou seja,  $I = I(\lambda, T)$ .

# Corpo Negro

→ Absorve *toda* a radiação sobre ele incidente.  
(portanto, seria visto como *negro*)

→ Tem certa temperatura  $T$ , portanto emite também radiação térmica  
(eletromagnética).

Em 1859, Kirchhoff propôs:

*“Para um corpo arbitrário emitindo radiação térmica, a razão  $E/A$  entre a radiância espectral emissiva,  $E$ , e o fator de absorção adimensional,  $A$ , é a mesma para todos os corpos a uma dada temperatura. A razão  $E/A$  é igual à radiância espectral emissiva  $I$  de um corpo negro perfeito que é uma função apenas de comprimento de onda e de temperatura.”*

Ou seja,  $I = I(\lambda, T)$ .

Kirchhoff desafiou os outros físicos a encontrarem a função  $I(\lambda, T)$ .

## Lei de Kirchhoff

*“Para um corpo arbitrário emitindo radiação térmica, a razão  $E/A$  entre a radiância espectral emissiva,  $E$ , e o fator de absorção adimensional,  $A$ , é a mesma para todos os corpos a uma dada temperatura. A razão  $E/A$  é igual à radiância espectral emissiva  $I$  de um corpo negro perfeito que é uma função apenas de comprimento de onda e de temperatura.”*

## Lei de Kirchhoff

*“Para um corpo arbitrário emitindo radiação térmica, a razão  $E/A$  entre a radiância espectral emissiva,  $E$ , e o fator de absorção adimensional,  $A$ , é a mesma para todos os corpos a uma dada temperatura. A razão  $E/A$  é igual à radiância espectral emissiva  $I$  de um corpo negro perfeito que é uma função apenas de comprimento de onda e de temperatura.”*

**Corolário 1:** emissividade e capacidade de absorção são iguais para um corpo negro em equilíbrio térmico:

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$$

## Corpo Negro

Supondo que um corpo de paredes opacas, rígidas e que não reflete de forma perfeita e conectado, por meio de uma fibra ótica a um corpo negro, ambos à mesma temperatura.

## Corpo Negro

Supondo que um corpo de paredes opacas, rígidas e que não reflete de forma perfeita e conectado, por meio de uma fibra ótica a um corpo negro, ambos à mesma temperatura.

Radiação pode fluir entre os corpos. Por exemplo, suponha que a densidade de fótons em uma faixa ao redor de um dado  $\lambda$  é maior no segundo sistema do que no primeiro.

## Corpo Negro

Supondo que um corpo de paredes opacas, rígidas e que não reflete de forma perfeita e conectado, por meio de uma fibra ótica a um corpo negro, ambos à mesma temperatura.

Radiação pode fluir entre os corpos. Por exemplo, suponha que a densidade de fótons em uma faixa ao redor de um dado  $\lambda$  é maior no segundo sistema do que no primeiro.

Se a fibra ótica permitisse a passagem de fótons apenas nessa faixa, haveria uma transferência de fótons e, por consequência, de energia entre os sistemas. Isso viola a 2<sup>a</sup> Lei de Termodinâmica...

## Corpo Negro

Supondo que um corpo de paredes opacas, rígidas e que não reflete de forma perfeita e conectado, por meio de uma fibra ótica a um corpo negro, ambos à mesma temperatura.

Radiação pode fluir entre os corpos. Por exemplo, suponha que a densidade de fótons em uma faixa ao redor de um dado  $\lambda$  é maior no segundo sistema do que no primeiro.

Se a fibra ótica permitisse a passagem de fótons apenas nessa faixa, haveria uma transferência de fótons e, por consequência, de energia entre os sistemas. Isso viola a 2ª Lei de Termodinâmica...

...pois não pode haver transferência líquida de calor entre dois corpos à mesma temperatura. As paredes do segundo sistema devem, portanto, absorver e emitir energia de forma a manter a radiação de corpo negro.

# Corpo Negro

Supondo que um corpo de paredes opacas, rígidas e que não reflete de forma perfeita e conectado, por meio de uma fibra ótica a um corpo negro, ambos à mesma temperatura.

Radiação pode fluir entre os corpos. Por exemplo, suponha que a densidade de fótons em uma faixa ao redor de um dado  $\lambda$  é maior no segundo sistema do que no primeiro.

Se a fibra ótica permitisse a passagem de fótons apenas nessa faixa, haveria uma transferência de fótons e, por consequência, de energia entre os sistemas. Isso viola a 2ª Lei de Termodinâmica...

...pois não pode haver transferência líquida de calor entre dois corpos à mesma temperatura. As paredes do segundo sistema devem, portanto, absorver e emitir energia de forma a manter a radiação de corpo negro.

Energia absorvida:  $\alpha_\lambda E(\lambda, T)$

Energia emitida:  $\varepsilon_\lambda E(\lambda, T)$

Equilíbrio térmico:  $\alpha_\lambda E(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda E(\lambda, T) \Rightarrow \alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$

# Lei de Kirchhoff

*“Para um corpo de material qualquer em equilíbrio térmico, emitindo e absorvendo radiação térmica eletromagnética em todos os comprimentos de onda, a razão entre sua potência emissiva e seu coeficiente de absorção adimensional é igual a uma função universal dependente somente de comprimento de onda e de temperatura.”*

**Corolário 1:** emissividade e capacidade de absorção são iguais para um corpo negro em equilíbrio térmico:

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$$

**Corolário 2:** emissividade não pode exceder 1 (já que a capacidade de absorção não o pode, por conservação de energia), então não é possível irradiar mais energia térmica do que um corpo negro em equilíbrio térmico.

# Leis de Kirchhoff na Espectroscopia

- 1) Um corpo opaco quente, sólido, líquido ou gasoso, emite um espectro contínuo.

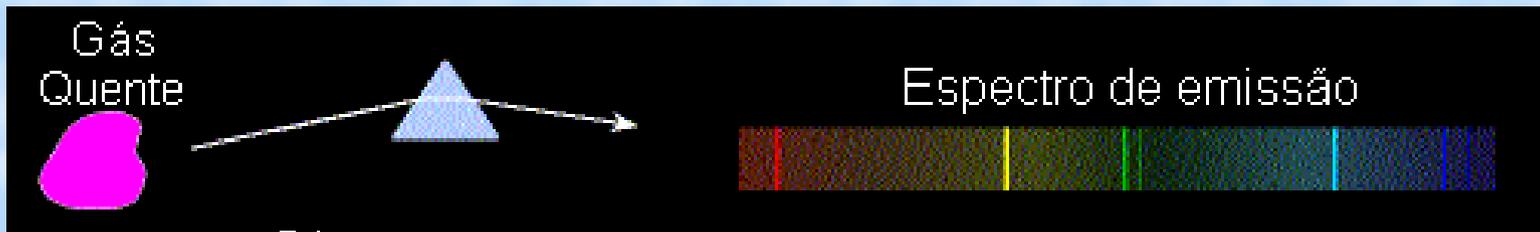


# Leis de Kirchhoff na Espectroscopia

- 1) Um corpo opaco quente, sólido, líquido ou gasoso, emite um espectro contínuo.



- 2) Um gás transparente produz um espectro de linhas brilhantes (de emissão). O número e a posição destas linhas depende dos elementos químicos presentes no gás.

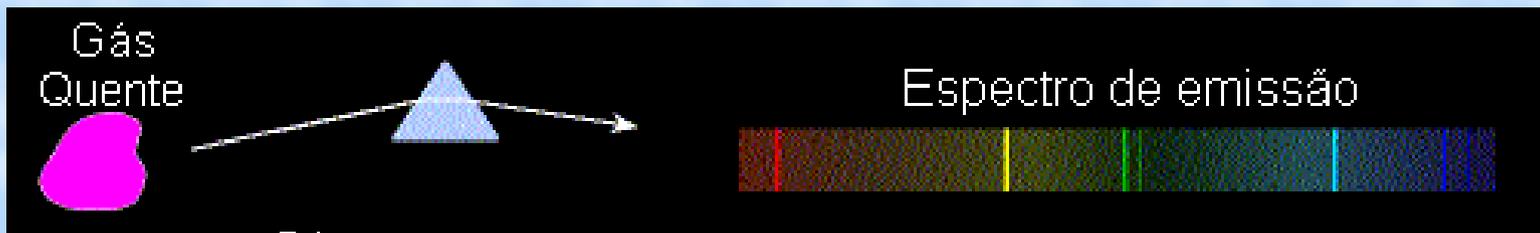


# Leis de Kirchhoff na Espectroscopia

- 1) Um corpo opaco quente, sólido, líquido ou gasoso, emite um espectro contínuo.



- 2) Um gás transparente produz um espectro de linhas brilhantes (de emissão). O número e a posição destas linhas depende dos elementos químicos presentes no gás.



- 3) Se um espectro contínuo passar por um gás à temperatura mais baixa, o gás frio causa a presença de linhas escuras (absorção). O número e a posição destas linhas depende dos elementos químicos presentes no gás.



# Lei de Stefan-Boltzmann

→ Obtida a partir de resultados experimentais por Jožef Stefan em 1879.

# Lei de Stefan-Boltzmann

- Obtida a partir de resultados experimentais por Jožef Stefan em 1879.
- Derivada a partir de considerações teóricas, utilizando termodinâmica, por Ludwig Boltzmann em 1884.

# Lei de Stefan-Boltzmann

- Obtida a partir de resultados experimentais por Jožef Stefan em 1879.
- Derivada a partir de considerações teóricas, utilizando termodinâmica, por Ludwig Boltzmann em 1884.
- Afirma que a energia total irradiada por unidade de área e de tempo por um corpo negro em todos os comprimentos de onda é diretamente proporcional à temperatura na quarta potência:

# Lei de Stefan-Boltzmann

→ Obtida a partir de resultados experimentais por Jožef Stefan em 1879.

→ Derivada a partir de considerações teóricas, utilizando termodinâmica, por Ludwig Boltzmann em 1884.

→ Afirma que a energia total irradiada por unidade de área e de tempo por um corpo negro em todos os comprimentos de onda é diretamente proporcional à temperatura na quarta potência:

$$j = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.670373 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ T}^{-4}$$

# Lei de Stefan-Boltzmann

→ Obtida a partir de resultados experimentais por Jožef Stefan em 1879.

→ Derivada a partir de considerações teóricas, utilizando termodinâmica, por Ludwig Boltzmann em 1884.

→ Afirma que a energia total irradiada por unidade de área e de tempo por um corpo negro em todos os comprimentos de onda é diretamente proporcional à temperatura na quarta potência:

$$j = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.670373 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ T}^{-4}$$

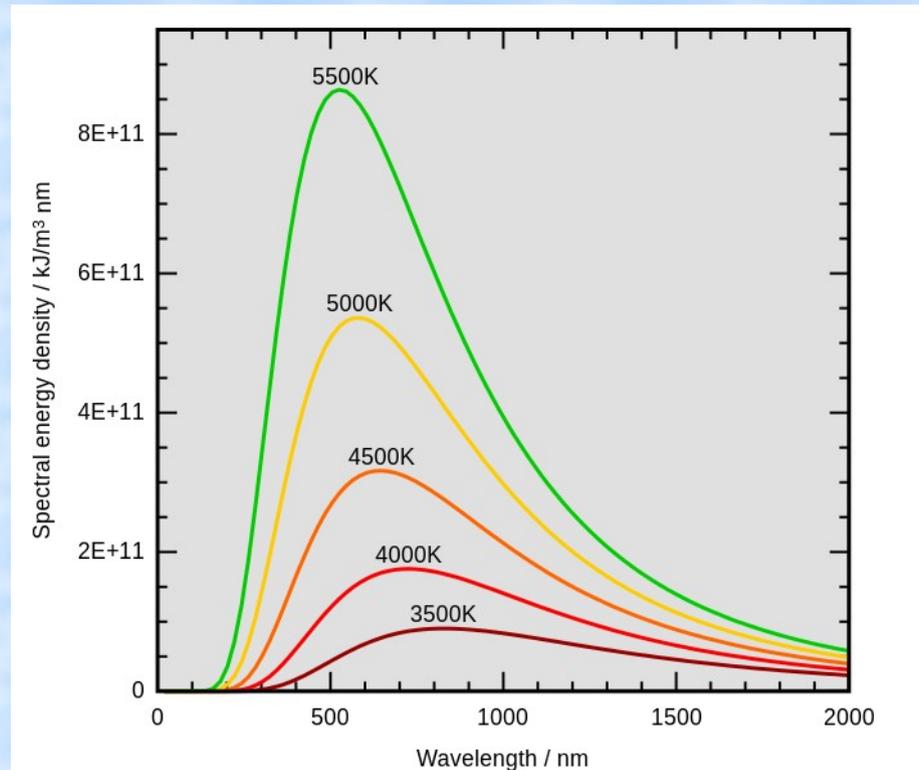
→ Mas *não* é a resposta ao desafio de Kirchhoff, porque ainda descreve a dependência em comprimento de onda.

# Lei de Wien

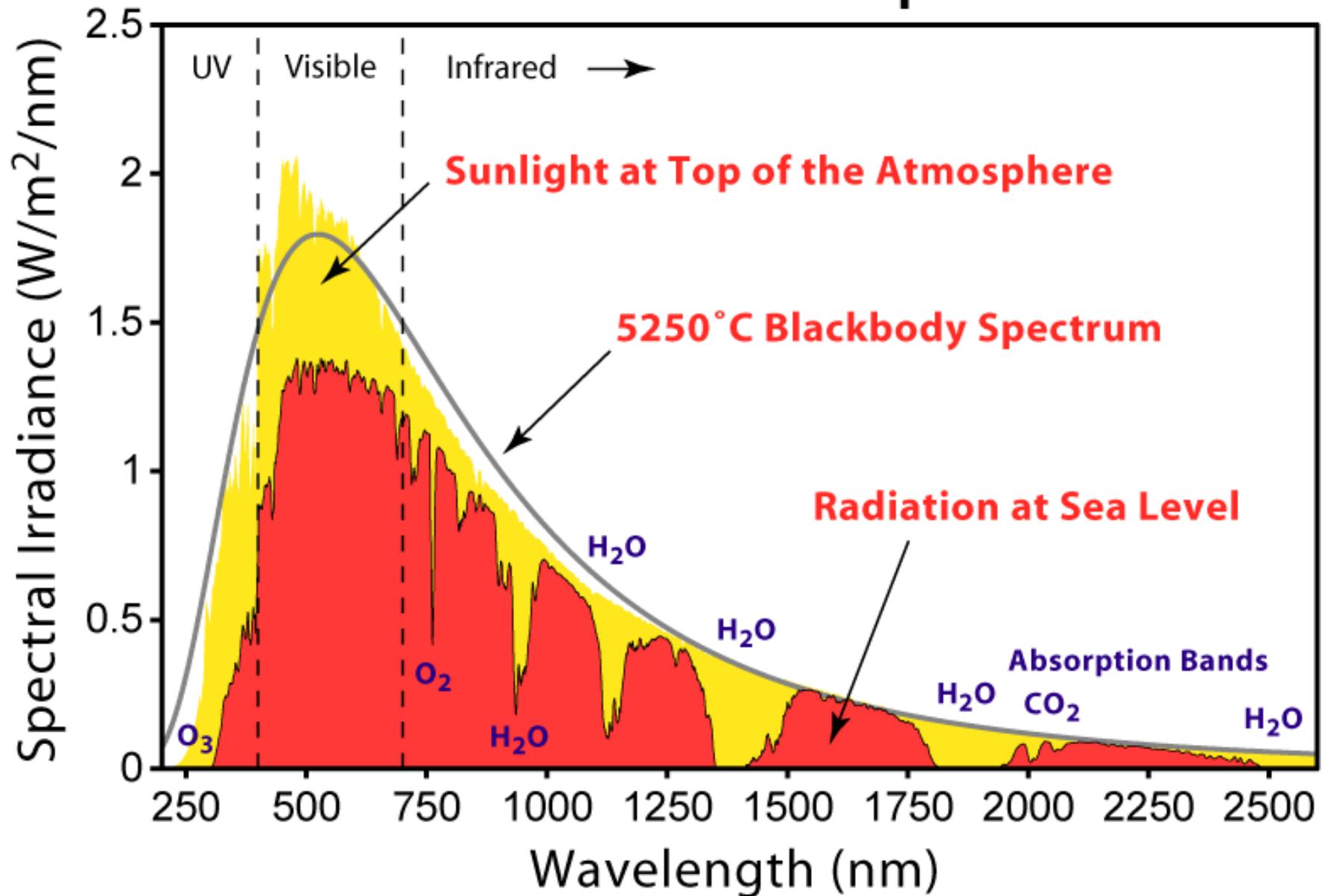
→ Wilhelm Wien derivou, em 1893, uma relação entre o comprimento de onda do pico da curva de emissão de um corpo negro e a temperatura:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{b}{T}$$

$$b = 2.8977721(26) \times 10^{-3}$$



# Solar Radiation Spectrum



# Aproximação de Wien

(ou Lei de Distribuição de Wien)

→ Em 1886, utilizando princípios de termodinâmica, Wien derivou uma equação a quantidade de energia, por unidade de área, de ângulo sólido, de tempo e de comprimento de onda emitida em um dado  $\lambda$ :

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

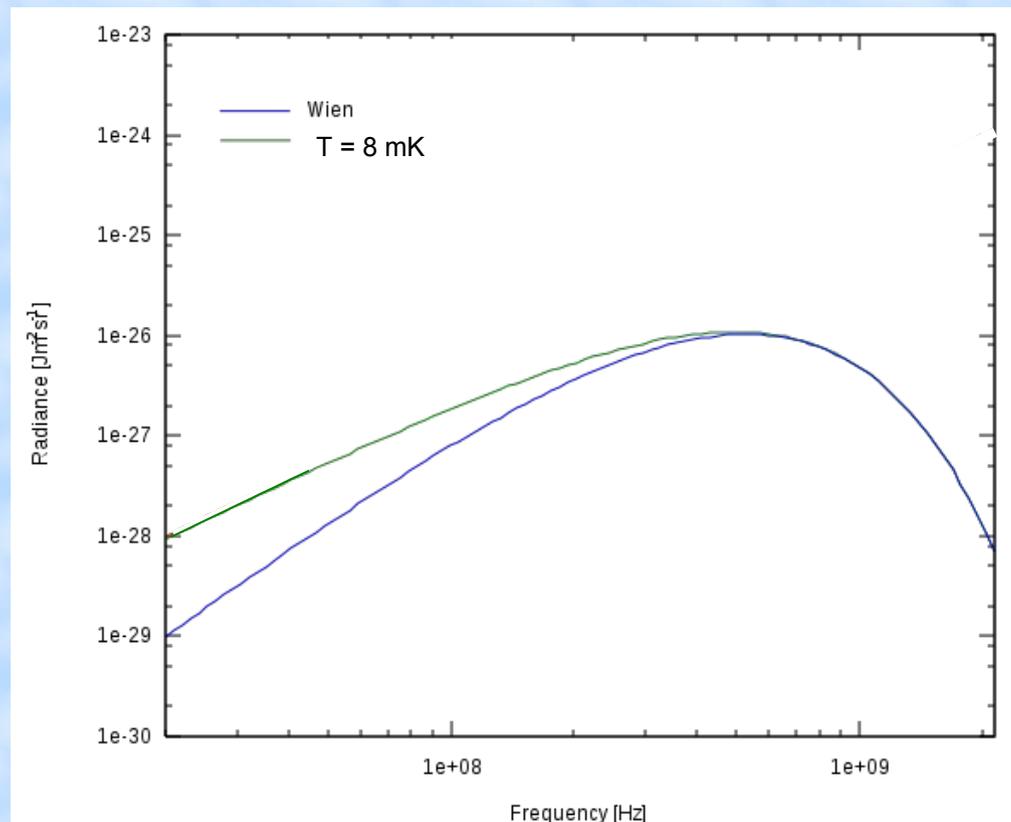
# Aproximação de Wien

(ou Lei de Distribuição de Wien)

→ Em 1886, utilizando princípios de termodinâmica, Wien derivou uma equação a quantidade de energia, por unidade de área, de ângulo sólido, de tempo e de comprimento de onda emitida em um dado  $\lambda$ :

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

→ Mas essa equação subestimava a energia irradiada em comprimentos de onda pequenos...

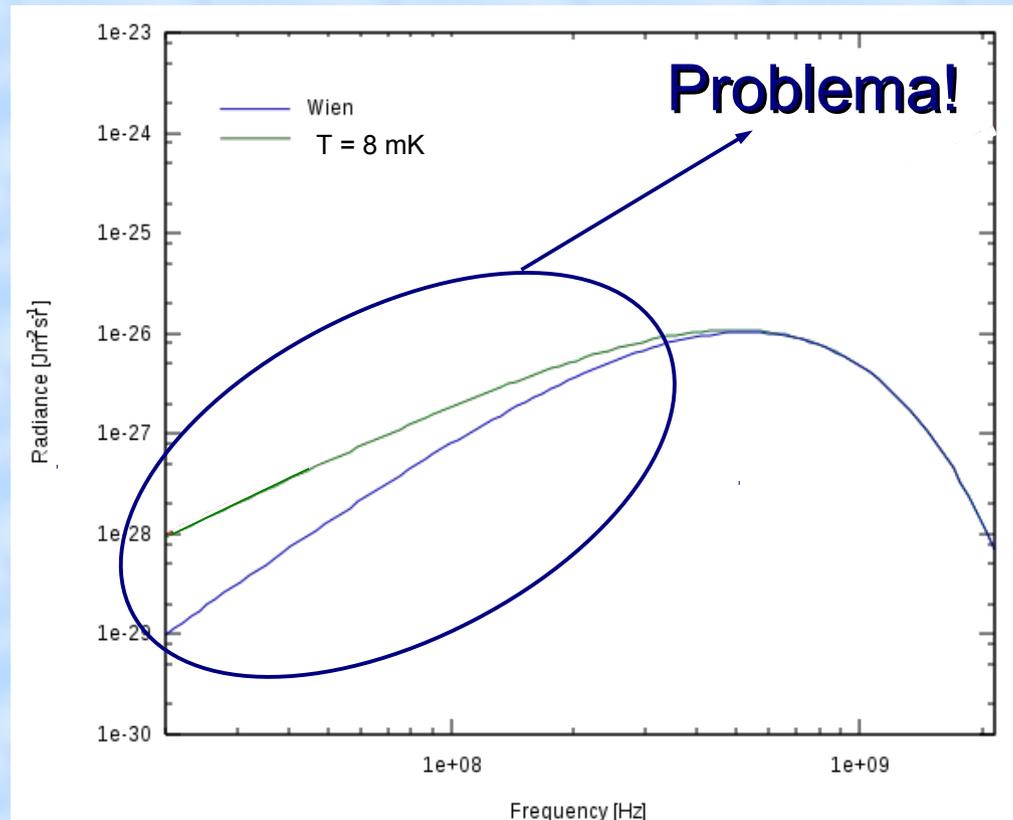


# Aproximação de Wien (ou Lei de Distribuição de Wien)

→ Em 1886, utilizando princípios de termodinâmica, Wien derivou uma equação a quantidade de energia, por unidade de área, de ângulo sólido, de tempo e de comprimento de onda emitida em um dado  $\lambda$ :

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

→ Mas essa equação subestimava a energia irradiada em comprimentos de onda pequenos...



## Lei de Rayleigh-Jeans

→ Lorde Rayleigh derivou a dependência da radiância espectral  $B_\lambda$  com  $\lambda^4$  baseado em argumentos de Física clássica em 1900.

# Lei de Rayleigh-Jeans

→ Lorde Rayleigh derivou a dependência da radiância espectral  $B_\lambda$  com  $\lambda^4$  baseado em argumentos de Física clássica em 1900.

→ Lorde Rayleigh e Sir Jeans apresentaram uma derivação mais completa, incluindo agora a constante de proporcionalidade, em 1905:

$$B_\lambda(T) = \frac{2 c k_B T}{\lambda^4}$$

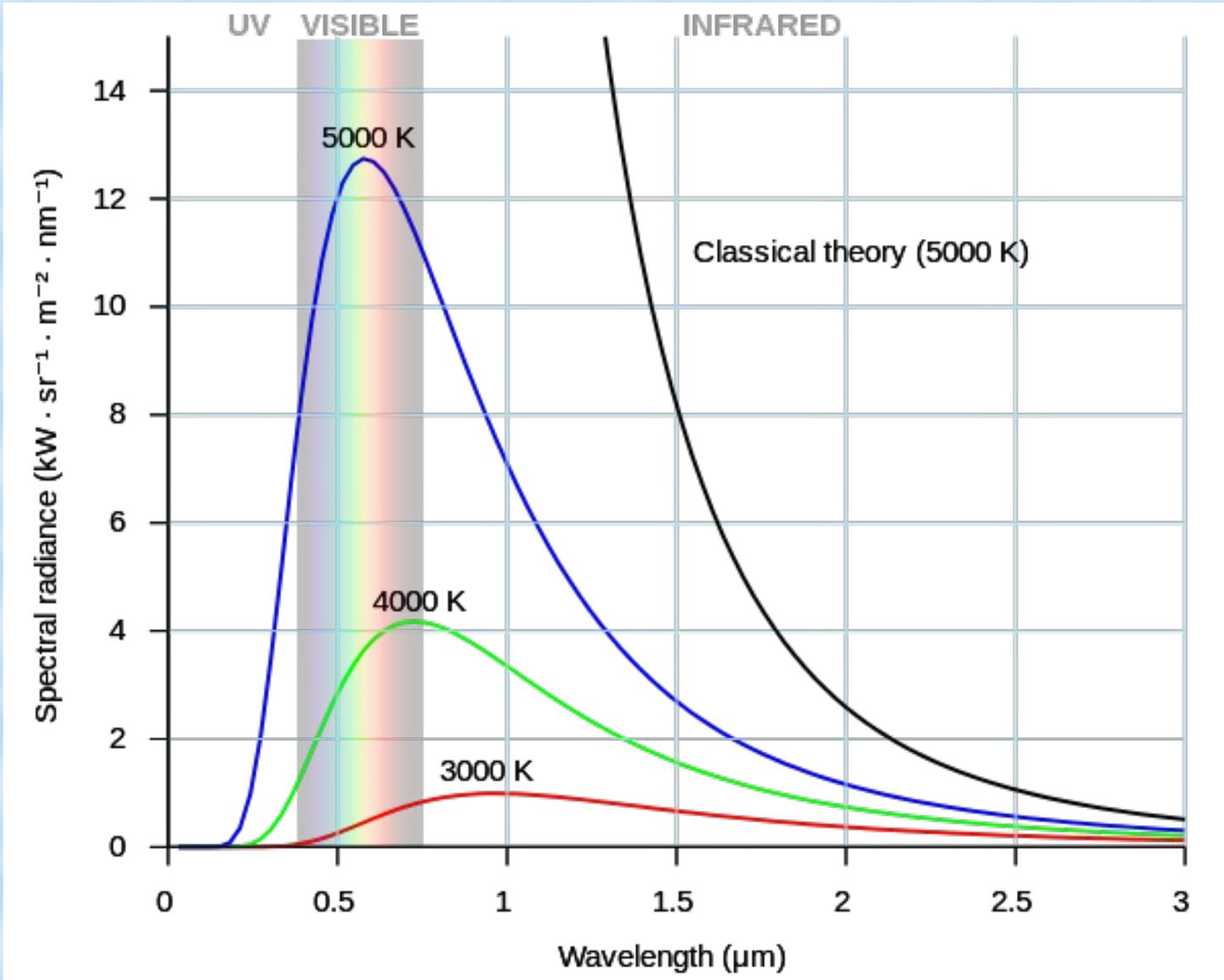
# Lei de Rayleigh-Jeans

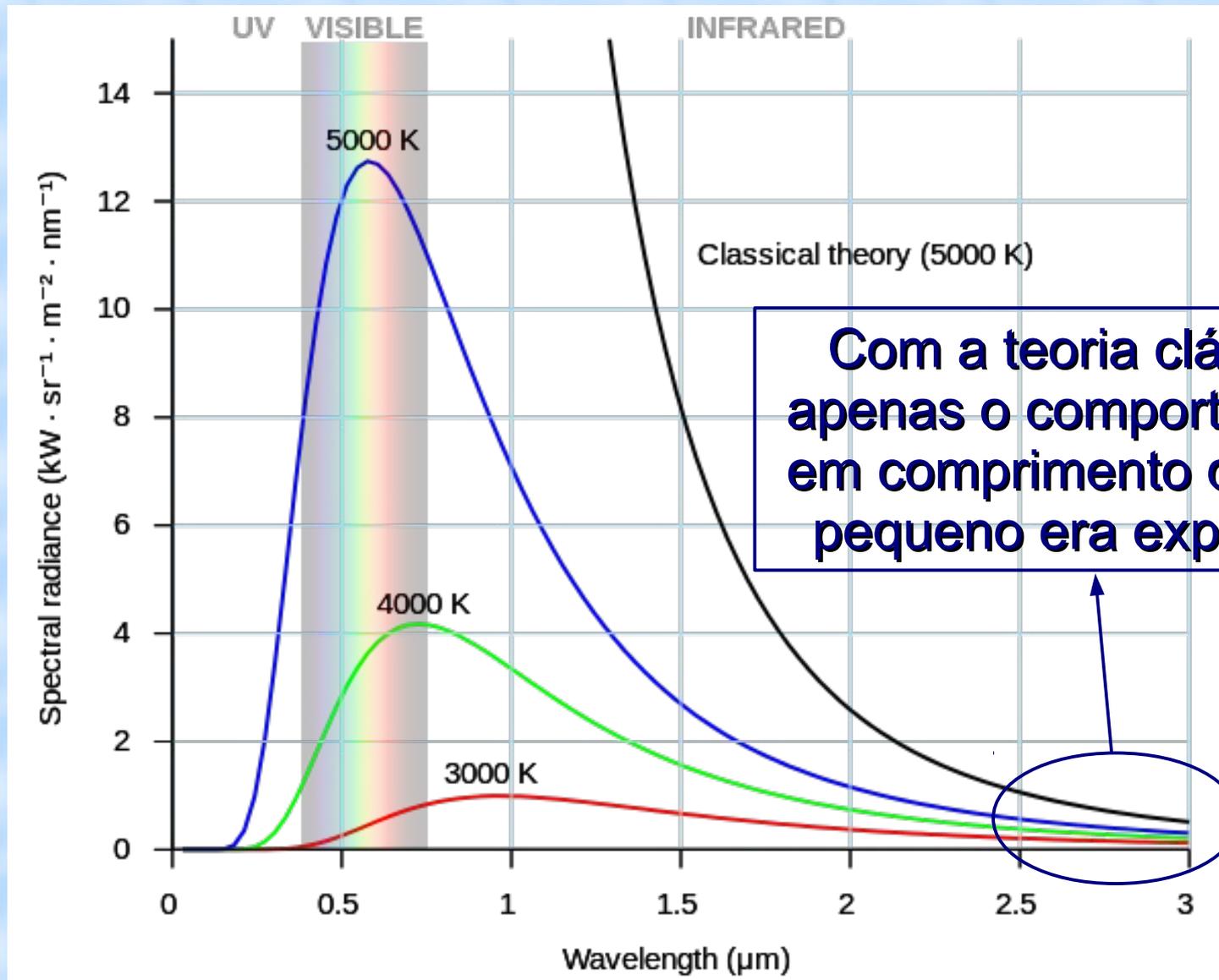
→ Lorde Rayleigh derivou a dependência da radiância espectral  $B_\lambda$  com  $\lambda^4$  baseado em argumentos de Física clássica em 1900.

→ Lorde Rayleigh e Sir Jeans apresentaram uma derivação mais completa, incluindo agora a constante de proporcionalidade, em 1905:

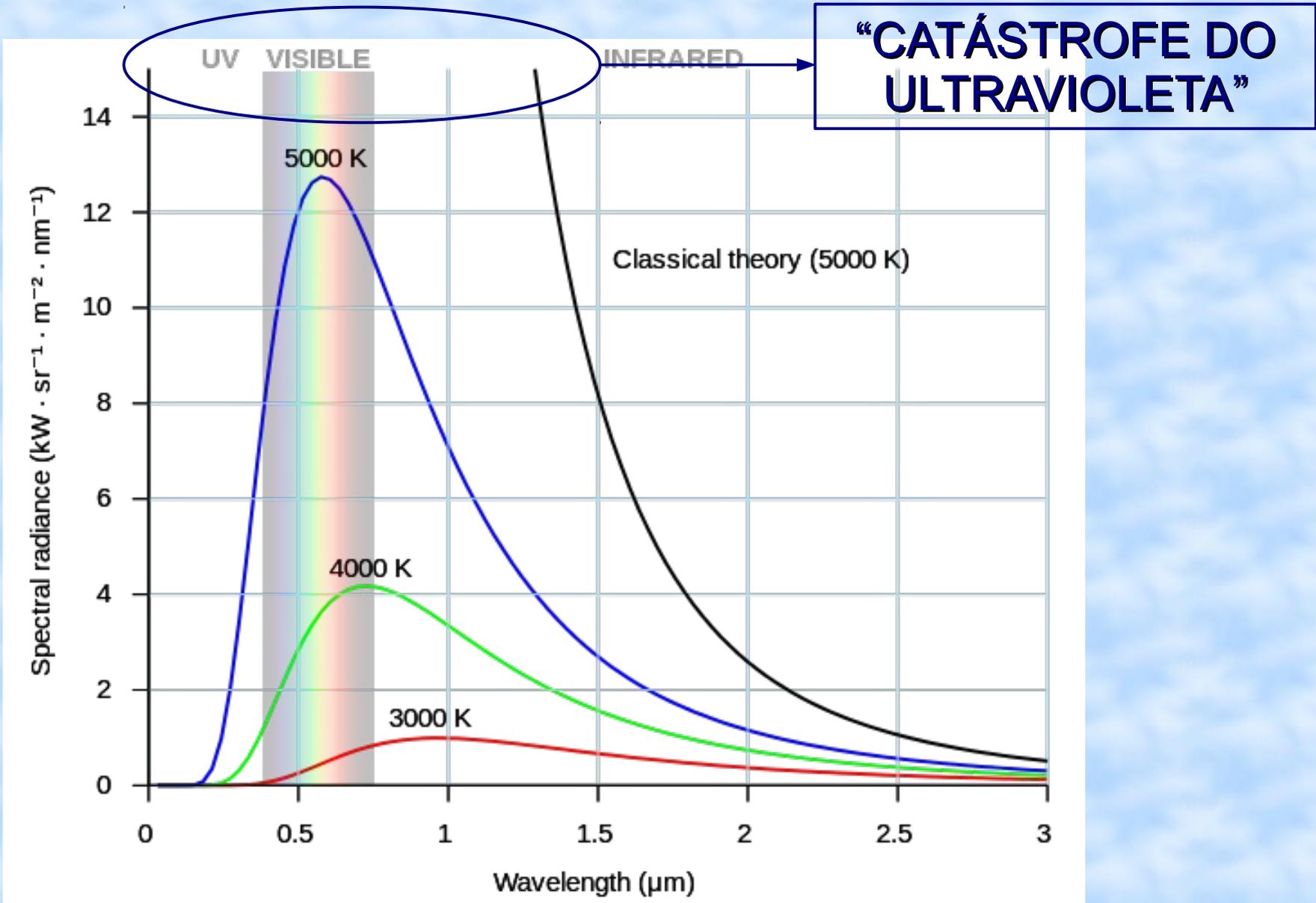
$$B_\lambda(T) = \frac{2 c k_B T}{\lambda^4}$$

→ A princípio, o problema proposto por Kirchhoff parecia resolvido, mas...





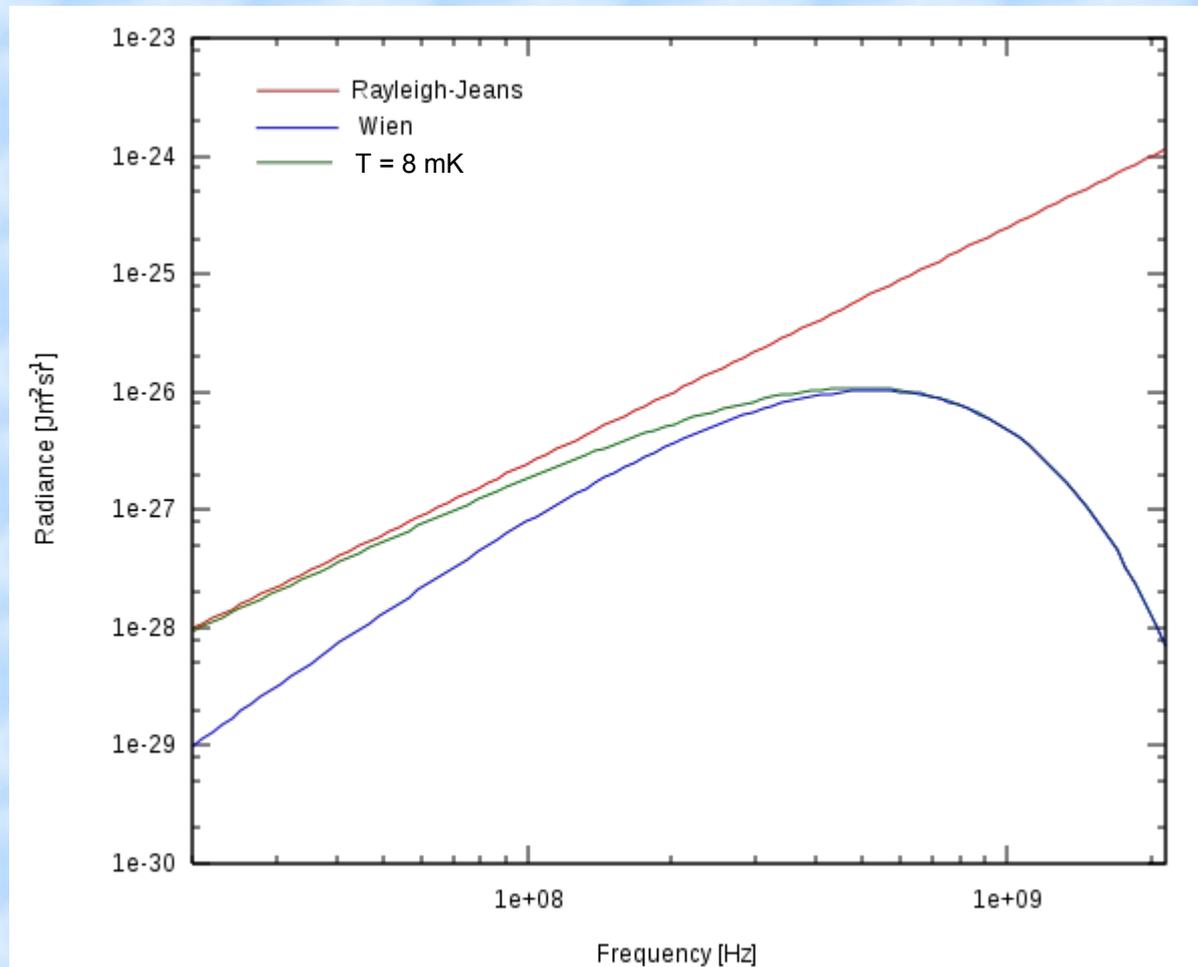
Com a teoria clássica, apenas o comportamento em comprimento de onda pequeno era explicado.



## Resumo da história:

***TERMODINÂMICA*** explicava o comportamento para  $\lambda$  ***GRANDE***.

***FÍSICA CLÁSSICA*** explicava o comportamento para  $\lambda$  ***PEQUENO***.



## Solução para o Problema

→ Em 1900, Heinrich Rubens, um dos físicos experimentais que verificou a catástrofe do ultravioleta, visitou Max Planck e mostrou-lhe seus resultados.

## Solução para o Problema

→ Em 1900, Heinrich Rubens, um dos físicos experimentais que verificou a catástrofe do ultravioleta, visitou Max Planck e mostrou-lhe seus resultados.

→ Planck rapidamente *advinhou* fórmula correta para o comportamento da radiação.

## Solução para o Problema

→ Em 1900, Heinrich Rubens, um dos físicos experimentais que verificou a catástrofe do ultravioleta, visitou Max Planck e mostrou-lhe seus resultados.

→ Planck rapidamente *advinhou* fórmula correta para o comportamento da radiação:

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

## Solução para o Problema

→ Em 1900, Heinrich Rubens, um dos físicos experimentais que verificou a catástrofe do ultravioleta, visitou Max Planck e mostrou-lhe seus resultados.

→ Planck rapidamente *advinhou* fórmula correta para o comportamento da radiação:

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

→ Não satisfeito, Planck resolveu derivar teoricamente tal equação. Para chegar ao resultado correto, ele precisou, contudo, fazer a suposição que a energia total é composta de elementos indistinguíveis de energia – *quanta* de energia.

## Solução para o Problema

→ Em 1900, Heinrich Rubens, um dos físicos experimentais que verificou a catástrofe do ultravioleta, visitou Max Planck e mostrou-lhe seus resultados.

→ Planck rapidamente *advinhou* fórmula correta para o comportamento da radiação:

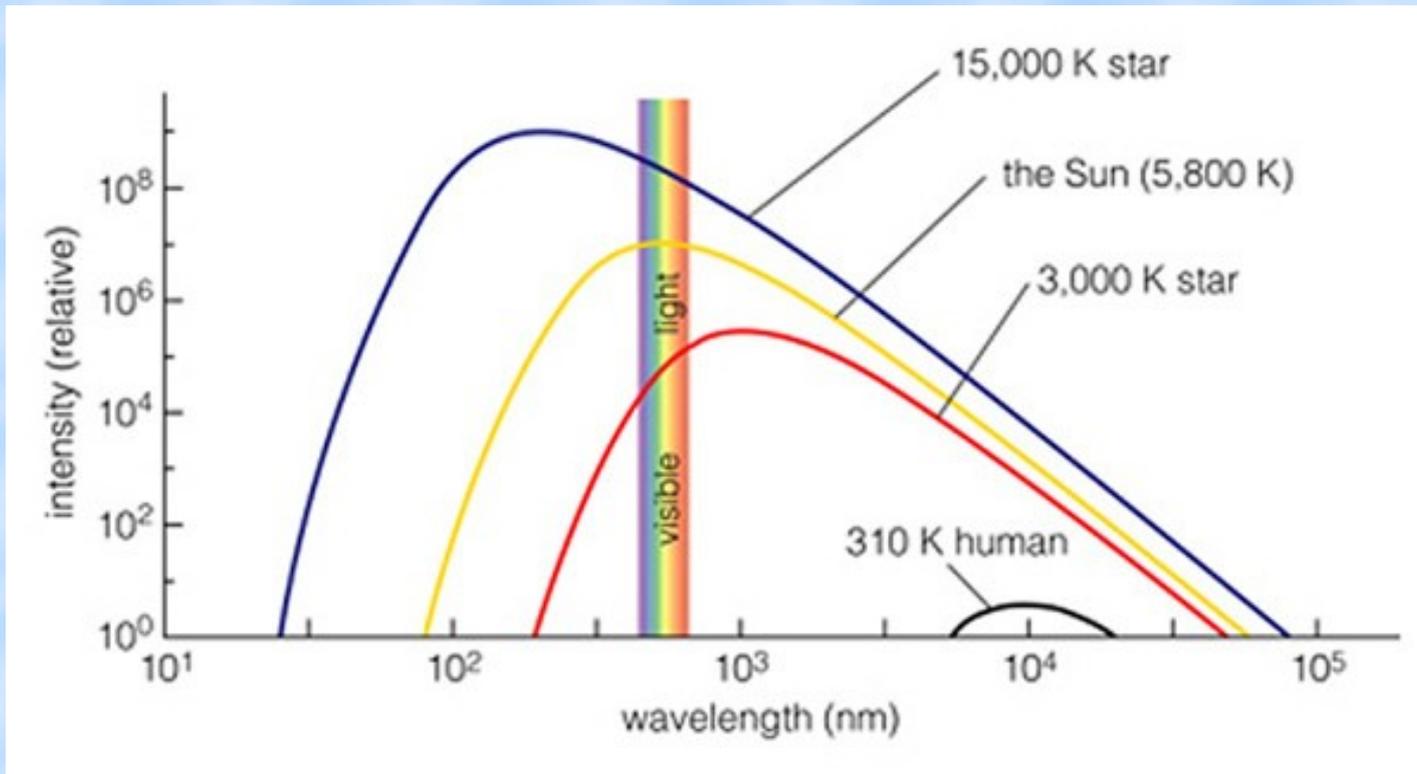
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

→ Não satisfeito, Planck resolveu derivar teoricamente tal equação. Para chegar ao resultado correto, ele precisou, contudo, fazer a suposição que a energia total é composta de elementos indistinguíveis de energia – *quanta* de energia.

Sobre isso, ele disse:

*“Experiências irão verificar se essa suposição é verdadeira na natureza.”*

# Lei de Planck



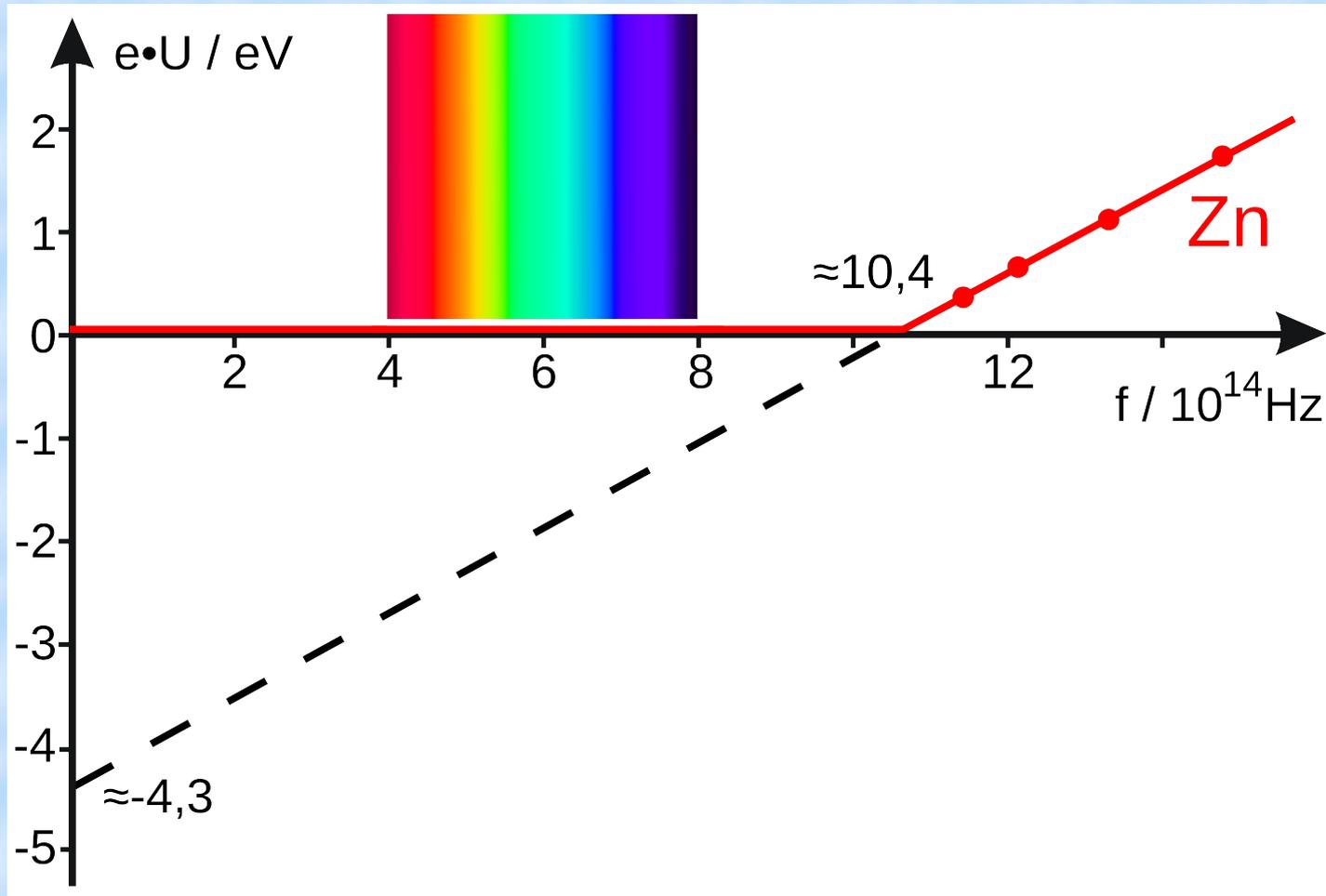
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

# O Efeito Fotoelétrico

→ Quando uma superfície é exposta à radiação eletromagnética acima de um certo limiar de frequência, radiação é absorvida e elétrons são emitidos.

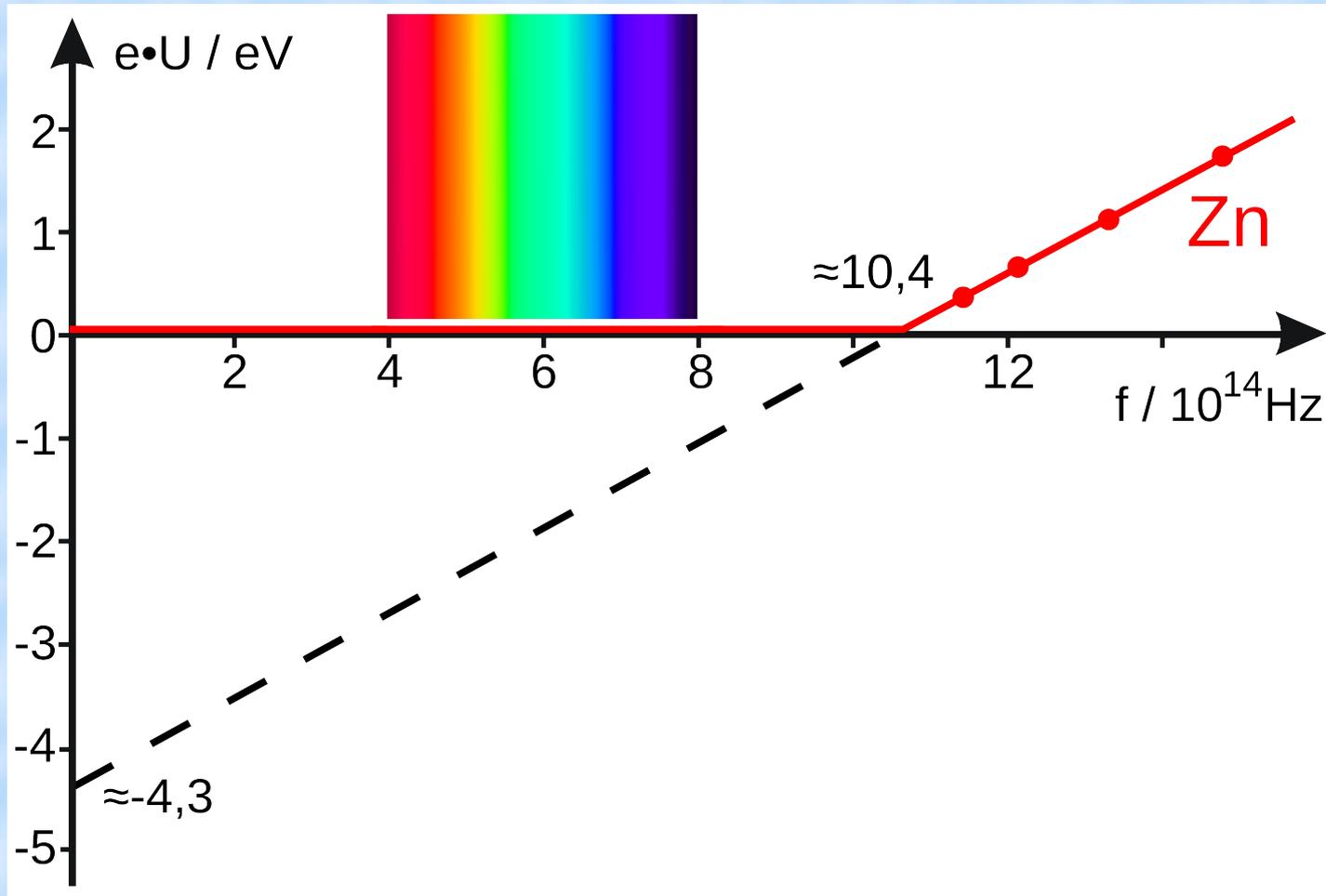
# O Efeito Fotoelétrico

→ Quando uma superfície é exposta à radiação eletromagnética acima de um certo limiar de frequência, radiação é absorvida e elétrons são emitidos.



# O Efeito Fotoelétrico

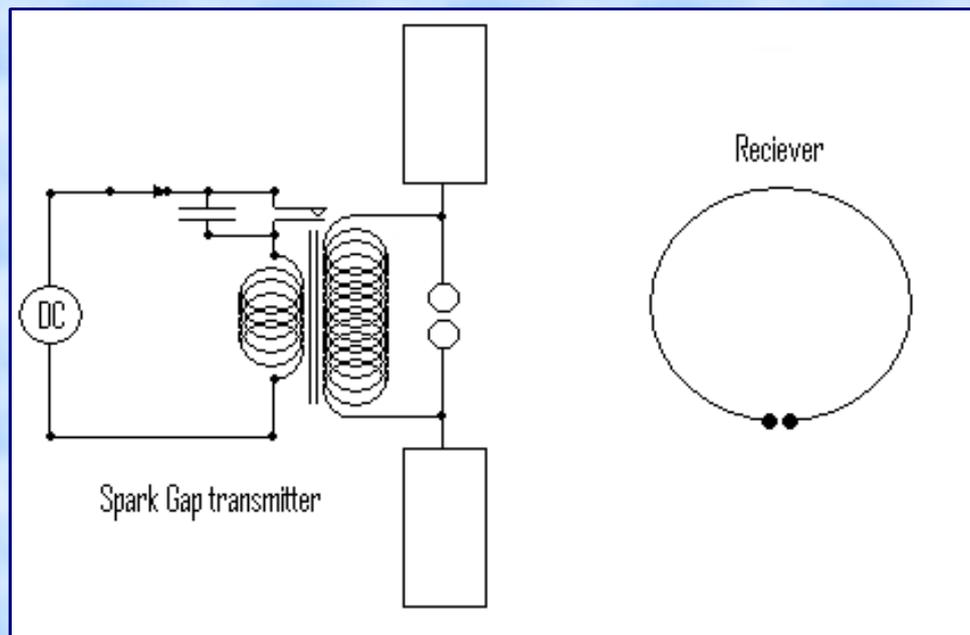
→ Quando uma superfície é exposta à radiação eletromagnética acima de um certo limiar de frequência, radiação é absorvida e elétrons são emitidos.



→ O limiar de frequência é, tipicamente, no visível para metais alcalinos, near-UV para outros metais e extreme-UV para não-metais.

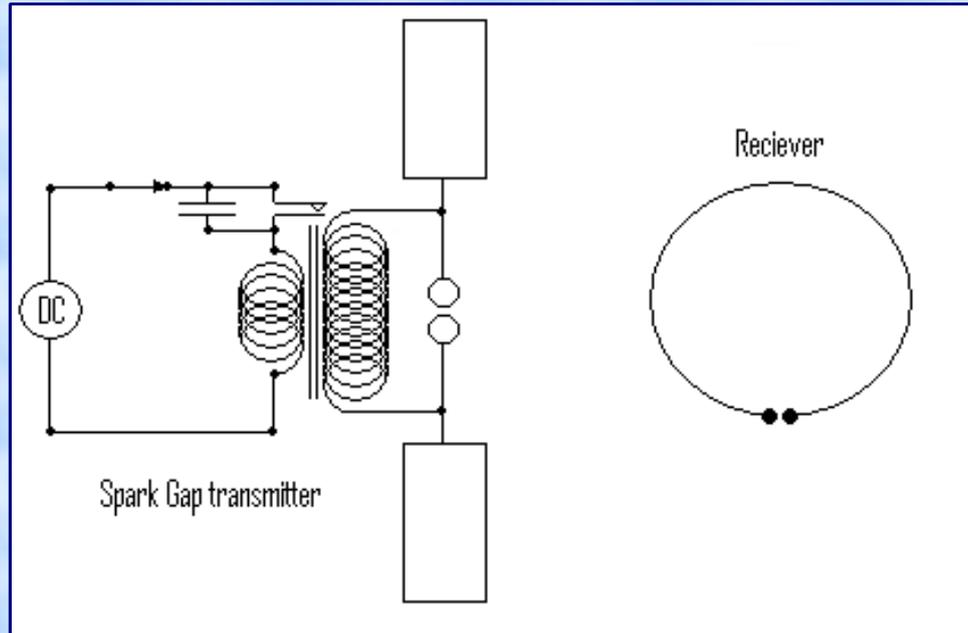
# O Efeito Fotoelétrico

→ O efeito foi observado pela primeira vez em 1887, por Heinrich Hertz, que notou que a incidência de luz UV em um centelhador aumentava as faíscas.



# O Efeito Fotoelétrico

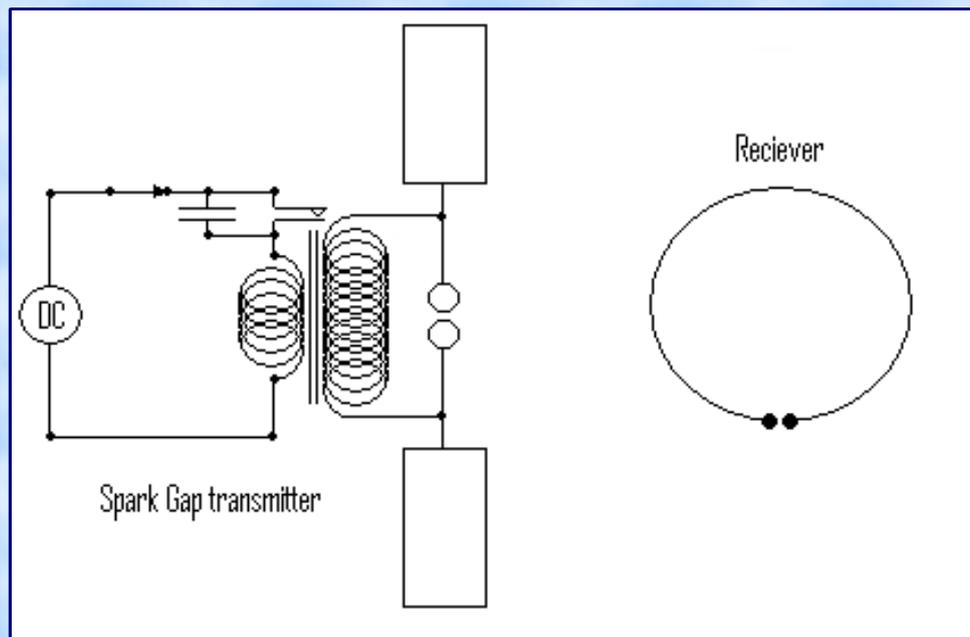
→ O efeito foi observado pela primeira vez em 1887, por Heinrich Hertz, que notou que a incidência de luz UV em um centelhador aumentava as faíscas.



→ Em 1902, Philipp Lenard observou que a energia dos elétrons individuais aumentava com a **frequência** da luz.

# O Efeito Fotoelétrico

→ O efeito foi observado pela primeira vez em 1887, por Heinrich Hertz, que notou que a incidência de luz UV em um centelhador aumentava as faíscas.



→ Em 1902, Philipp Lenard observou que a energia dos elétrons individuais aumentava com a **frequência** da luz.

→ Isso parecia não estar de acordo com a teoria desenvolvida por Maxwell para descrever a luz, que previa que a energia dos elétrons seria proporcional à **intensidade** da luz.

## O Efeito Fotoelétrico

→ Em 1905, Einstein encontrou a resposta para esse aparente paradoxo descrevendo a luz em termos de *quanta* discretos, agora chamados **fótons**, em vez de ondas contínuas.

# O Efeito Fotoelétrico

- Em 1905, Einstein encontrou a resposta para esse aparente paradoxo descrevendo a luz em termos de *quanta* discretos, agora chamados **fótons**, em vez de ondas contínuas.
- Inspirado nas ideias de Planck sobre a radiação de corpo negro, ele teorizou que a energia em cada *quantum* de luz era igual a uma constante multiplicada pela frequência:

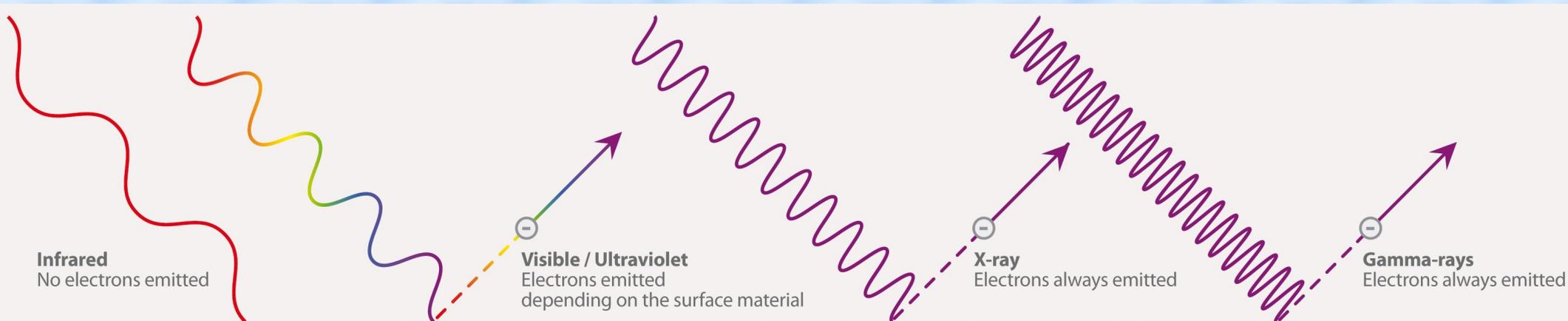
$$E = hf$$

# O Efeito Fotoelétrico

- Em 1905, Einstein encontrou a resposta para esse aparente paradoxo descrevendo a luz em termos de *quanta* discretos, agora chamados **fótons**, em vez de ondas contínuas.
- Inspirado nas ideias de Planck sobre a radiação de corpo negro, ele teorizou que a energia em cada *quantum* de luz era igual a uma constante multiplicada pela frequência:

$$E = hf$$

Assim, um fóton acima de uma dada frequência terá a energia necessária para ejetar um único elétron, criando o efeito observado.



# O Efeito Fotoelétrico

→ A mecânica clássica previa que os elétrons poderiam “acumular” aos poucos energia de uma fonte de baixa intensidade até serem emitidos, o que não se verificava.

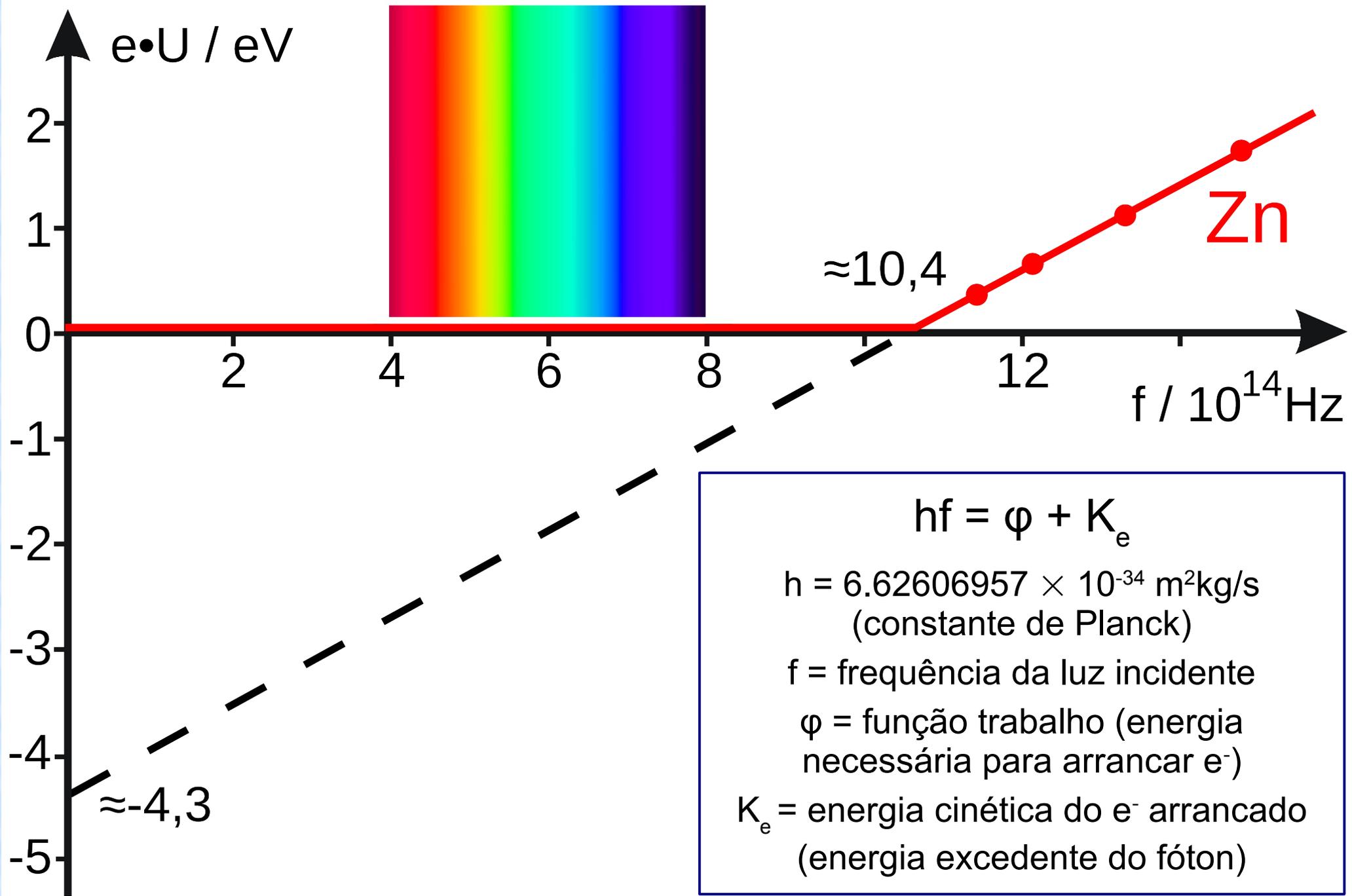
# O Efeito Fotoelétrico

→ A mecânica clássica previa que os elétrons poderiam “acumular” aos poucos energia de uma fonte de baixa intensidade até serem emitidos, o que não se verificava.

Einstein definitivamente explicou por que a energia de fotoelétrons dependia somente da luz incidente e não de sua intensidade:

→ uma fonte de baixa intensidade, mas alta frequência, poderia fornecer alguns fótons de alta energia.

→ por outro lado, uma fonte de alta intensidade, mas baixa frequência, não forneceria nenhum fóton com energia suficiente para remover um elétron.



# O Efeito Fotoelétrico

→ A mecânica clássica previa que os elétrons poderiam “acumular” aos poucos energia de uma fonte de baixa intensidade até serem emitidos, o que não se verificava.

Einstein definitivamente explicou por que a energia de fotoelétrons dependia somente da luz incidente e não de sua intensidade:

→ uma fonte de baixa intensidade, mas alta frequência, poderia fornecer alguns fótons de alta energia.

→ por outro lado, uma fonte de alta intensidade, mas baixa frequência, não forneceria nenhum fóton com energia suficiente para remover um elétron.

→ Contudo, o conceito de quantização da energia foi altamente rejeitado de início, pois parecia contradizer as Equações de Maxwell, que eram bem compreendidas e verificadas.

# Dualidade Onda-partícula

→ Louis de Broglie fez, em sua tese de doutorado publicada em 1924, uma hipótese revolucionária. Segundo ele:

*“A ideia fundamental [da minha tese] era o seguinte: o fato de que a luz contém partículas, que são concentrações de energia incorporadas na onda, conforme a introdução de Einstein do conceito de fótons de luz, sugere que todas as partículas, como o elétron, devem ser transportados por uma onda na qual estão incorporadas [...] Minha ideia essencial era estender a todas as partículas a coexistência entre ondas e partículas descoberta por Einstein em 1905 para o caso da luz e dos fótons.”*

## Dualidade Onda-partícula

→ Assim, a cada partícula de matéria com massa  $m$  e velocidade  $v$ , uma onda deve ser associada, cujo comprimento de onda relaciona-se com o momentum linear pela equação:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

# Dualidade Onda-partícula

→ Assim, a cada partícula de matéria com massa  $m$  e velocidade  $v$ , uma onda deve ser associada, cujo comprimento de onda relaciona-se com o momentum linear pela equação:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

**Exemplos:**

→ Elétron:  $\lambda = 3.03 \times 10^{-21} \text{ m}$

→ Bola de futebol:  $\lambda = 9.54 \times 10^{-35} \text{ m}$

→ Pessoa correndo:  $\lambda = 1.32 \times 10^{-36} \text{ m}$

→ Carro:  $\lambda = 1.61 \times 10^{-38} \text{ m}$

## Verificação da dualidade onda-partícula: o experimento de Davisson–Germer

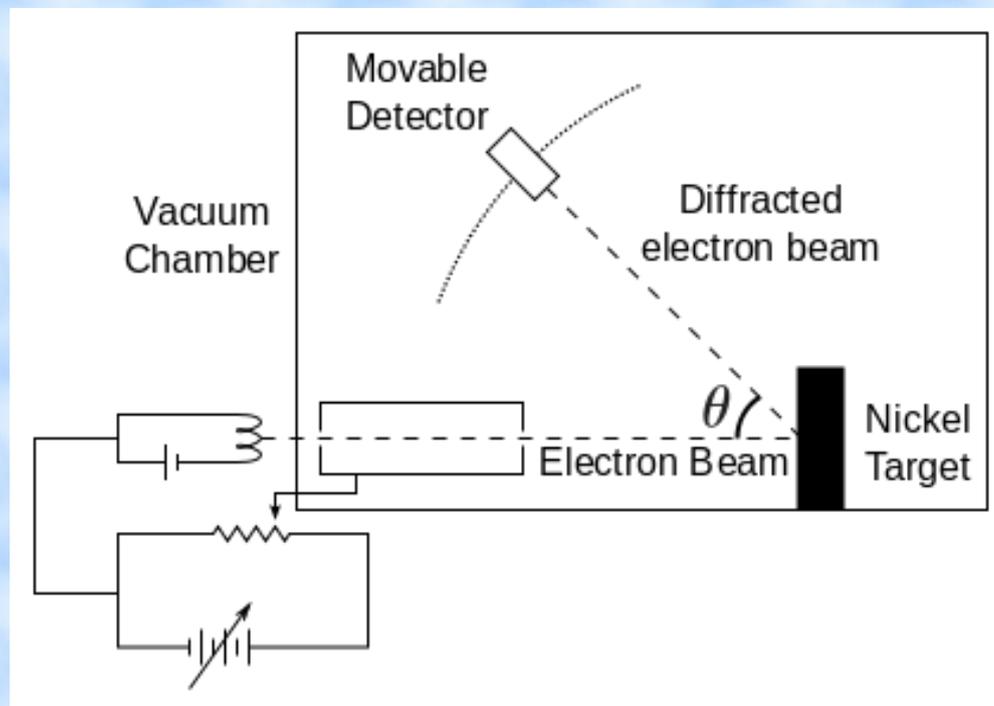
→ Conduzido pelos físicos americanos Clinton Davisson and Lester Germer entre 1923 e 1927, *confirmou* a hipótese de de Broglie.

## Verificação da dualidade onda-partícula: o experimento de Davisson–Germer

- Conduzido pelos físicos americanos Clinton Davisson and Lester Germer entre 1923 e 1927, *confirmou* a hipótese de de Broglie.
- A ideia original foi do físico alemão Walter M. Elsasser, que sugeriu que a hipótese poderia ser verificada investigando espalhamento de elétrons em sólidos cristalinos.

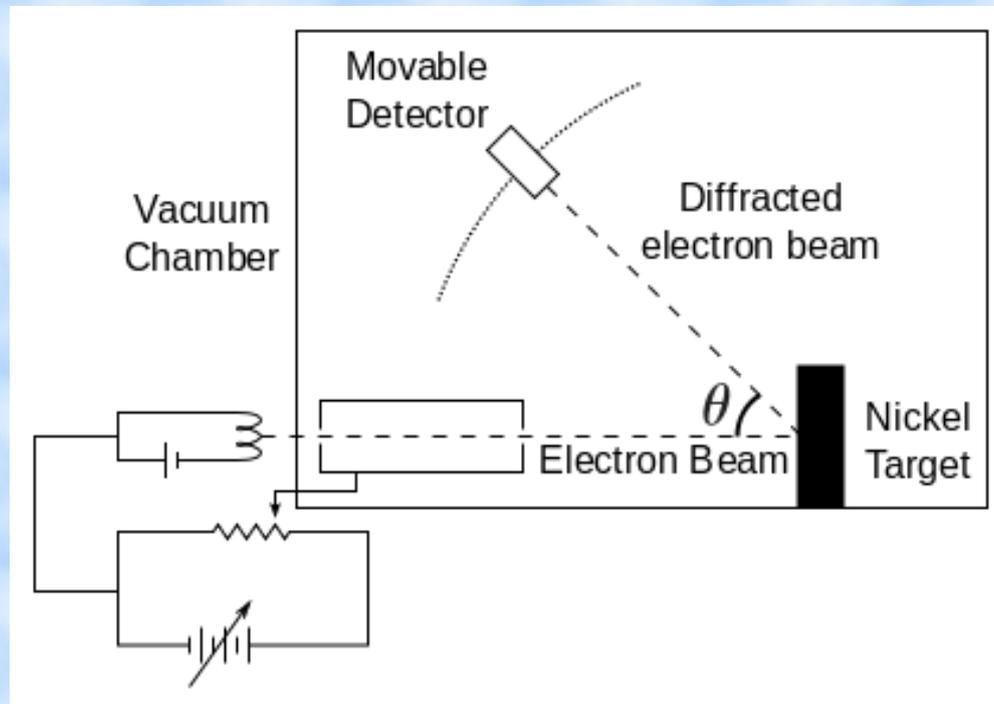
## Verificação da dualidade onda-partícula: o experimento de Davisson–Germer

- Conduzido pelos físicos americanos Clinton Davisson and Lester Germer entre 1923 e 1927, *confirmou* a hipótese de de Broglie.
- A ideia original foi do físico alemão Walter M. Elsasser, que sugeriu que a hipótese poderia ser verificada investigando espalhamento de elétrons em sólidos cristalinos.
- O objetivo original do experimento era de Davisson-Germer era estudar a superfície do níquel.



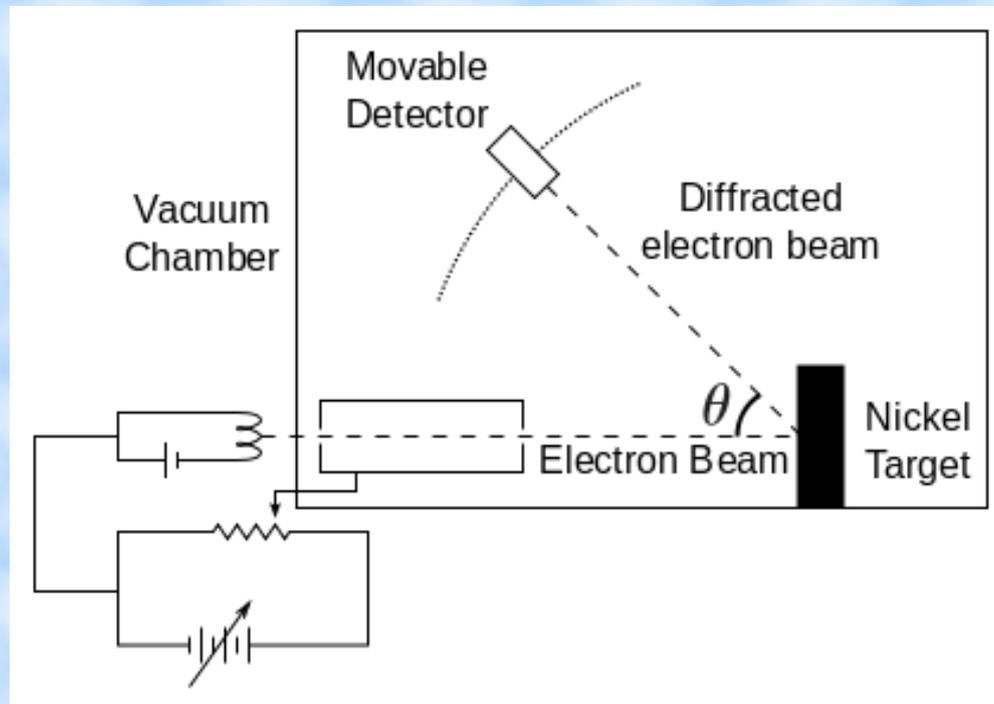
## Verificação da dualidade onda-partícula: o experimento de Davisson–Germer

→ Eles incidiram elétrons em alvo de níquel cristalino e verificaram que a dependência angular da intensidade de elétrons refletidos tinha o mesmo padrão de difração previsto para Bragg para raios-X.



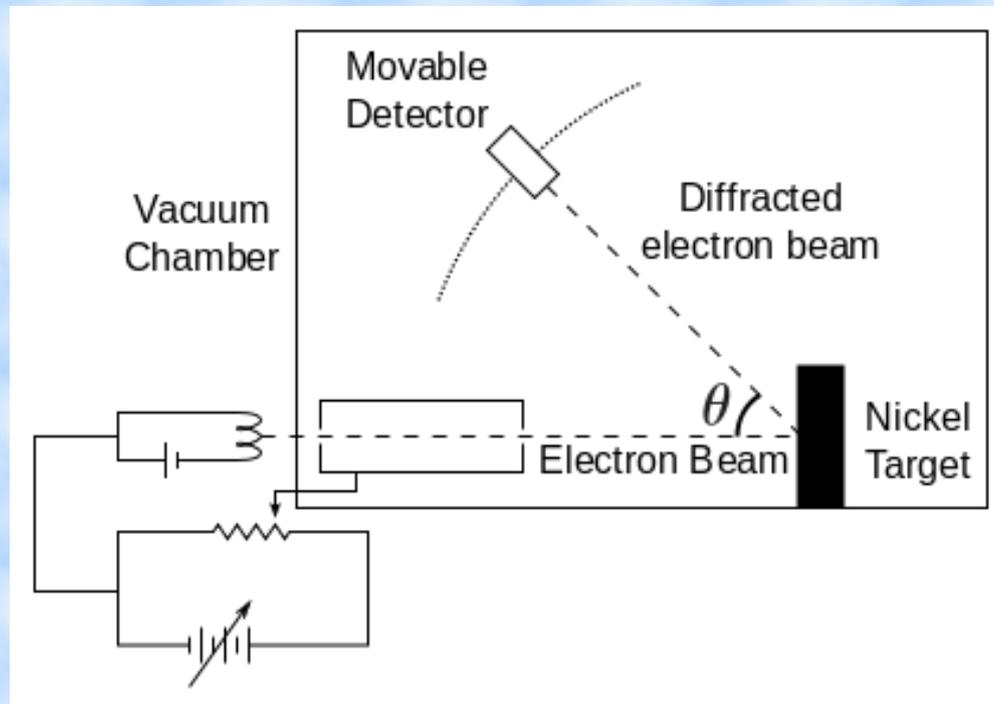
## Verificação da dualidade onda-partícula: o experimento de Davisson–Germer

- Eles incidiram elétrons em alvo de níquel cristalino e verificaram que a dependência angular da intensidade de elétrons refletidos tinha o mesmo padrão de difração previsto para Bragg para raios-X.
- O experimento foi independentemente reproduzido por George Thomson.



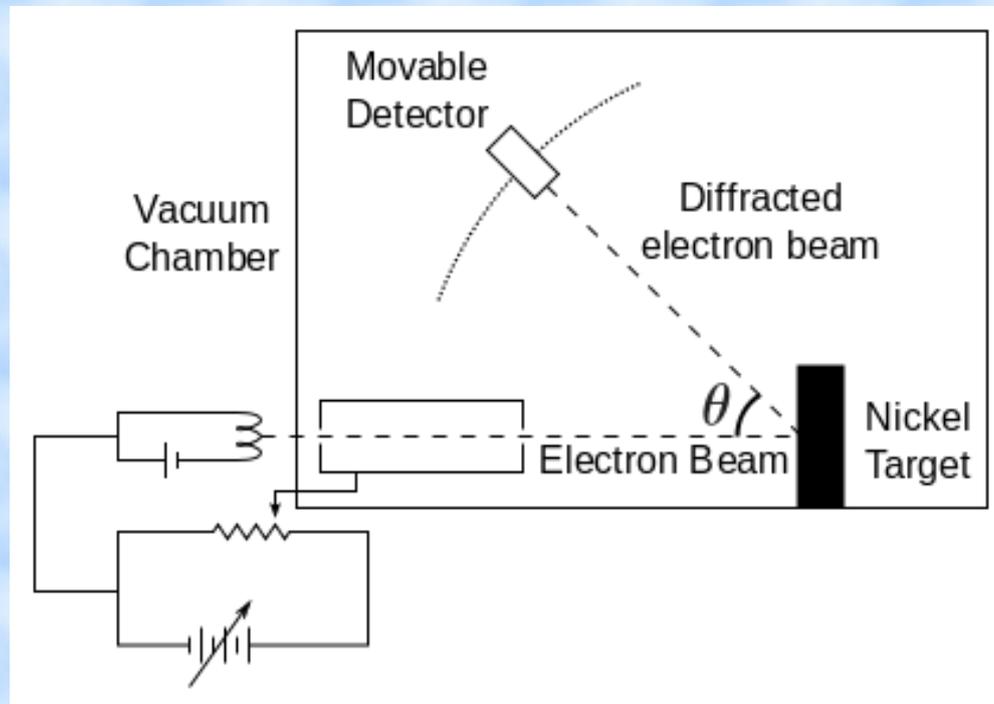
## Verificação da dualidade onda-partícula: o experimento de Davisson–Germer

- Eles incidiram elétrons em alvo de níquel cristalino e verificaram que a dependência angular da intensidade de elétrons refletidos tinha o mesmo padrão de difração previsto para Bragg para raios-X.
- O experimento foi independentemente reproduzido por George Thomson.
- A hipótese de de Broglie estava, então, confirmada.



## Verificação da dualidade onda-partícula: o experimento de Davisson–Germer

- Eles incidiram elétrons em alvo de níquel cristalino e verificaram que a dependência angular da intensidade de elétrons refletidos tinha o mesmo padrão de difração previsto para Bragg para raios-X.
- O experimento foi independentemente reproduzido por George Thomson.
- A hipótese de de Broglie estava, então, confirmada.



Hoje, até difração de  $C_{60}$  (fulereno) já foi observada!

**Esses eventos marcaram o início da Mecânica Quântica.**

**Esses eventos marcaram o início da Mecânica Quântica.**

**Mas a história não acaba aí.**

**Esses eventos marcaram o início da Mecânica Quântica.**

**Mas a história não acaba aí.**

**1927 → Werner Heisenberg formula o princípio de incerteza.**

Esses eventos marcaram o início da Mecânica Quântica.

Mas a história não acaba aí.

1927 → Werner Heisenberg formula o princípio de incerteza.  
Princípio de Incerteza = conjunto de desigualdades matemáticas que evidenciam um *limite fundamental* para a precisão com que certos pares de variáveis podem ser medidos simultaneamente.

Esses eventos marcaram o início da Mecânica Quântica.

Mas a história não acaba aí.

1927 → Werner Heisenberg formula o princípio de incerteza.  
Princípio de Incerteza = conjunto de desigualdades matemáticas que evidenciam um *limite fundamental* para a precisão com que certos pares de variáveis podem ser medidos simultaneamente.

Exemplo: posição e momentum são observáveis incompatíveis.

$$\sigma_x \sigma_p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Esses eventos marcaram o início da Mecânica Quântica.

Mas a história não acaba aí.

1927 → Werner Heisenberg formula o princípio de incerteza.  
Princípio de Incerteza = conjunto de desigualdades matemáticas que evidenciam um *limite fundamental* para a precisão com que certos pares de variáveis podem ser medidos simultaneamente.

Exemplo: posição e momentum são observáveis incompatíveis.

$$\sigma_x \sigma_p \geq \frac{\hbar}{2}$$

O princípio de incerteza é *inerente* às propriedades de todos os sistemas ondulatórios, e surge na mecânica quântica simplesmente devido à dualidade onda-partícula à qual toda a matéria está sujeita.

Esses eventos marcaram o início da Mecânica Quântica.

Mas a história não acaba aí.

1927 → Werner Heisenberg formula o princípio de incerteza.  
Princípio de Incerteza = conjunto de desigualdades matemáticas que evidenciam um *limite fundamental* para a precisão com que certos pares de variáveis podem ser medidos simultaneamente.

Exemplo: posição e momentum são observáveis incompatíveis.

$$\sigma_x \sigma_p \geq \frac{\hbar}{2}$$

O princípio de incerteza é *inerente* às propriedades de todos os sistemas ondulatórios, e surge na mecânica quântica simplesmente devido à dualidade onda-partícula à qual toda a matéria está sujeita.

(Não tem nada a ver com uma influência ou limitação do observador!)

**Mas o que significa essa incerteza inerente?**

**Mas o que significa essa incerteza inerente?  
Existem diferentes interpretações!**

**Mas o que significa essa incerteza inerente?  
Existem diferentes interpretações!**

**Interpretação = maneira conceitual ou argumentativa de conciliar o formalismo matemático, a fenomenologia dos experimentos e a interpretação física do fenômeno. Deve compreender:**

**Mas o que significa essa incerteza inerente?  
Existem diferentes interpretações!**

**Interpretação = maneira conceitual ou argumentativa de conciliar o formalismo matemático, a fenomenologia dos experimentos e a interpretação física do fenômeno. Deve compreender:**

- 1. Natureza abstrata, matemática, das teorias quânticas.**
- 2. Existência de processos aparentemente não-determinísticos, mas reversíveis.**
- 3. Papel do observador na determinação de resultados.**
- 4. Distinção entre preparação e medida de um estado.**
- 5. Correlação entre objetos distantes.**
- 6. Complementaridade entre diferentes descrições.**

**Posicionam-se com relação a:**

**→ Realismo das “ferramentas”;**

**→ Completeza da teoria;**

**→ Determinismo;**

**→ Realimo das medidas (realismo local);**

**→ Causalidade.**

# Interpretação de Copenhagem

→ Formulada por Niels Bohr e Werner Heisenberg em 1927;

# Interpretação de Copenhagem

- Formulada por Niels Bohr e Werner Heisenberg em 1927;
- É a interpretação “padrão” da Mecânica Quântica;

# Interpretação de Copenhagem

- Formulada por Niels Bohr e Werner Heisenberg em 1927;
- É a interpretação “padrão” da Mecânica Quântica;
- Rejeita questionamentos como “onde estava a partícula antes de eu a medir?” – são *irrelevantes*.

# Interpretação de Copenhagem

- Formulada por Niels Bohr e Werner Heisenberg em 1927;
- É a interpretação “padrão” da Mecânica Quântica;
- Rejeita questionamentos como “onde estava a partícula antes de eu a medir?” – são *irrelevantes*.
- A medida seleciona exatamente uma das muitas possibilidades permitidas pela função de onda em uma maneira consistente com as probabilidades bem-definidas associadas a cada estado.

# Interpretação de Copenhagem

- Formulada por Niels Bohr e Werner Heisenberg em 1927;
- É a interpretação “padrão” da Mecânica Quântica;
- Rejeita questionamentos como “onde estava a partícula antes de eu a medir?” – são *irrelevantes*.
- A medida seleciona exatamente uma das muitas possibilidades permitidas pela função de onda em uma maneira consistente com as probabilidades bem-definidas associadas a cada estado.
- O observador ou detector causa o colapso da função de onda.

*“Realidade está nas observações, não no elétron.”*

*– Paul Davis*

# Interpretação de Von Neumann-Wigner (ou Consciência causa Colapso)

→ Concentra-se na análise do problema da medida;

## Interpretação de Von Neumann-Wigner (ou Consciência causa Colapso)

- Concentra-se na análise do problema da medida;
- John von Neumann descreveu como uma medida poderia causar o colapso da função de onda.

## Interpretação de Von Neumann-Wigner (ou Consciência causa Colapso)

- Concentra-se na análise do problema da medida;
- John von Neumann descreveu como uma medida poderia causar o colapso da função de onda.
- A visão foi estendida por Eugene Wigner, que argumentou que um humano *consciente* (ou um cachorro *consciente*) era necessário para o colapso.

## Interpretação de Von Neumann-Wigner (ou Consciência causa Colapso)

- Concentra-se na análise do problema da medida;
- John von Neumann descreveu como uma medida poderia causar o colapso da função de onda.
  - A visão foi estendida por Eugene Wigner, que argumentou que um humano *consciente* (ou um cachorro *consciente*) era necessário para o colapso.
- Ligada à ideia de princípio antrópico: não há nada de marcante no fato de o Universo ser assim, pois se ele não o fosse, não estaríamos aqui para questionar.

## Teorias de Colapso Objetivo

→ Colapso ocorre aleatoriamente, e o observador não tem nenhum papel especial.

## Teorias de Colapso Objetivo

- Colapso ocorre aleatoriamente, e o observador não tem nenhum papel especial.
- A teoria é realísta, não-determinística e não tem variáveis ocultas.

## Teorias de Colapso Objetivo

- Colapso ocorre aleatoriamente, e o observador não tem nenhum papel especial.
- A teoria é realísta, não-determinística e não tem variáveis ocultas.
  - Ex.: Interpretação de Penrose: propõe que um estado quântico permanece em superposição *até que a diferença na curvatura do espaço tempo atinja um nível significativo*. Trata-se de uma previsão da relação entre mecânica quântica e relatividade geral.

## Interpretação de Muitos-Mundos

→ Uma função de onda universal obedece sempre às mesmas leis determinísticas, reversíveis. Não há um colapso (irreversível e indeterminístico) da função de onda associado à medida.

## Interpretação de Muitos-Mundos

- Uma função de onda universal obedece sempre às mesmas leis determinísticas, reversíveis. Não há um colapso (irreversível e indeterminístico) da função de onda associado à medida.
- Reivindica que todas as possíveis histórias e futuros alternativos são reais, cada um representando um universo (ou *mundo*) verdadeiro.

## Interpretação de Muitos-Mundos

- Uma função de onda universal obedece sempre às mesmas leis determinísticas, reversíveis. Não há um colapso (irreversível e indeterminístico) da função de onda associado à medida.
- Reivindica que todas as possíveis histórias e futuros alternativos são reais, cada um representando um universo (ou *mundo*) verdadeiro.
- Em termos leigos: afirma que existe um número muito grande, talvez infinito, de universos alternativos e que tudo que poderia ter acontecido no passado, mas não aconteceu, aconteceu no passado de outro(s) universo(s).

## Interpretação de Muitos-Mundos

- Uma função de onda universal obedece sempre às mesmas leis determinísticas, reversíveis. Não há um colapso (irreversível e indeterminístico) da função de onda associado à medida.
- Reivindica que todas as possíveis histórias e futuros alternativos são reais, cada um representando um universo (ou *mundo*) verdadeiro.
- Em termos leigos: afirma que existe um número muito grande, talvez infinito, de universos alternativos e que tudo que poderia ter acontecido no passado, mas não aconteceu, aconteceu no passado de outro(s) universo(s).
- Proposta originalmente pelo físico americano Hugh Everett III, que, por ter virado alvo de chacota devido a tal teoria, abandonou a carreira de física após concluir seu doutorado.

## Variáveis Ocultas

→ A Mecânica Quântica está incompleta: o estado físico, conforme formulado pela Mecânica Quântica, não fornece uma descrição completa do sistema.

## Variáveis Ocultas

- A Mecânica Quântica está incompleta: o estado físico, conforme formulado pela Mecânica Quântica, não fornece uma descrição completa do sistema.
- Uma teoria completa forneceria categorias para explicar todos os comportamentos observáveis e evitar não-determinismo.

## Variáveis Ocultas

- A Mecânica Quântica está incompleta: o estado físico, conforme formulado pela Mecânica Quântica, não fornece uma descrição completa do sistema.
- Uma teoria completa forneceria categorias para explicar todos os comportamentos observáveis e evitar não-determinismo.
  - É a teoria que defendia Albert Einstein:  
*“Eu estou convencido de que Deus não joga dados.”*

## Variáveis Ocultas

- A Mecânica Quântica está incompleta: o estado físico, conforme formulado pela Mecânica Quântica, não fornece uma descrição completa do sistema.
- Uma teoria completa forneceria categorias para explicar todos os comportamentos observáveis e evitar não-determinismo.
  - É a teoria que defendia Albert Einstein:  
*“Eu estou convencido de que Deus não joga dados.”*
- Einstein, Podolski e Rosen (EPR) argumentaram que “elementos de realidade” – variáveis ocultas – devem ser adicionados à Mecânica Quântica para explicar emaranhamento sem ação à distância.