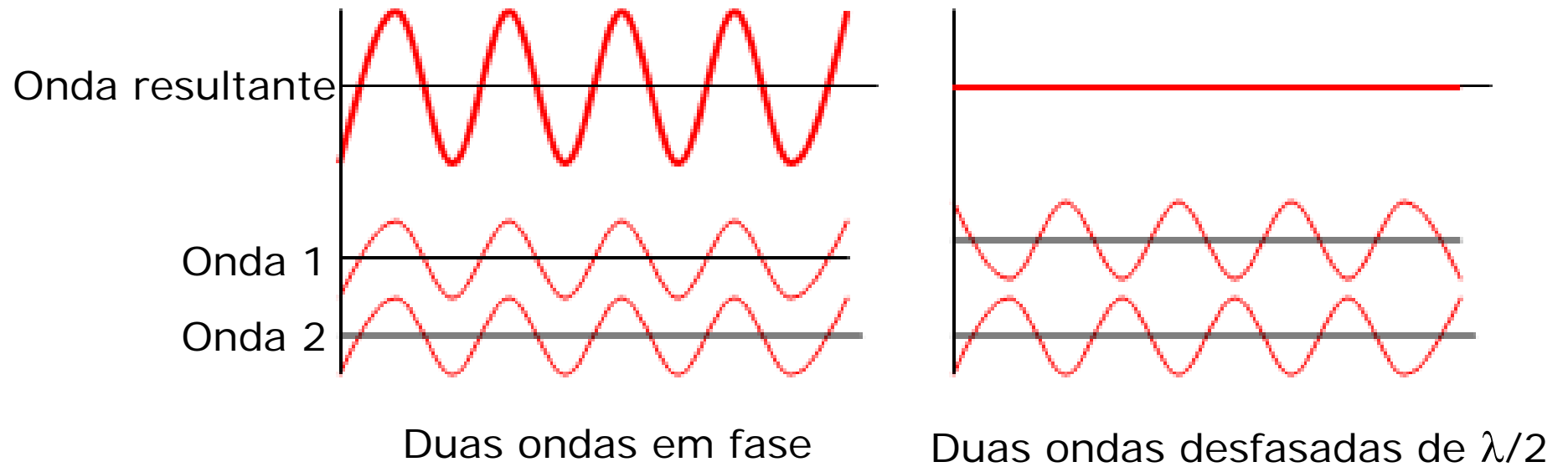


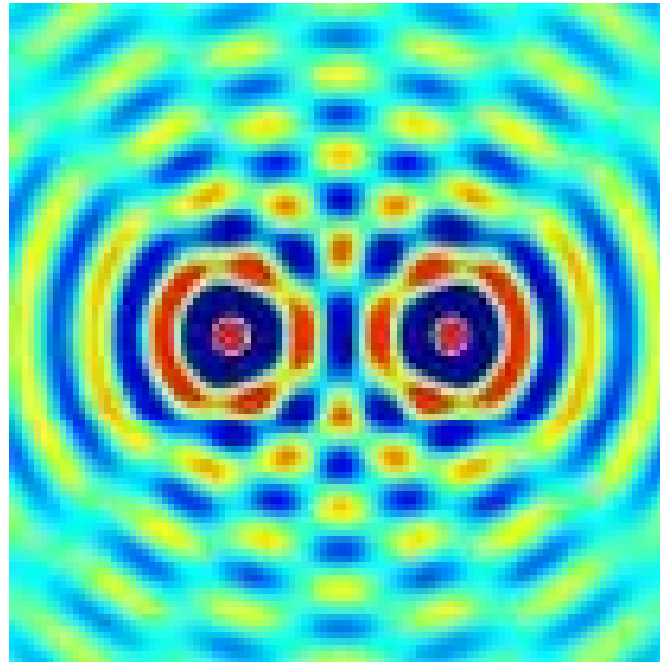
# FENÓMENOS CORPUSCULARES E ONDULATÓRIOS



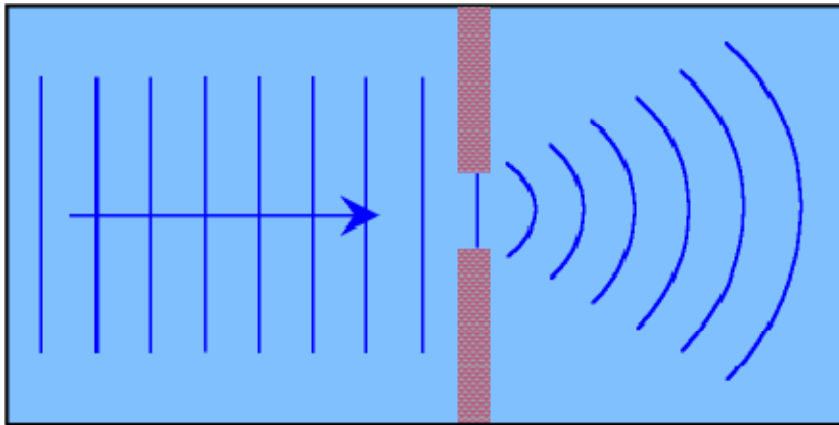
## Interferência de ondas



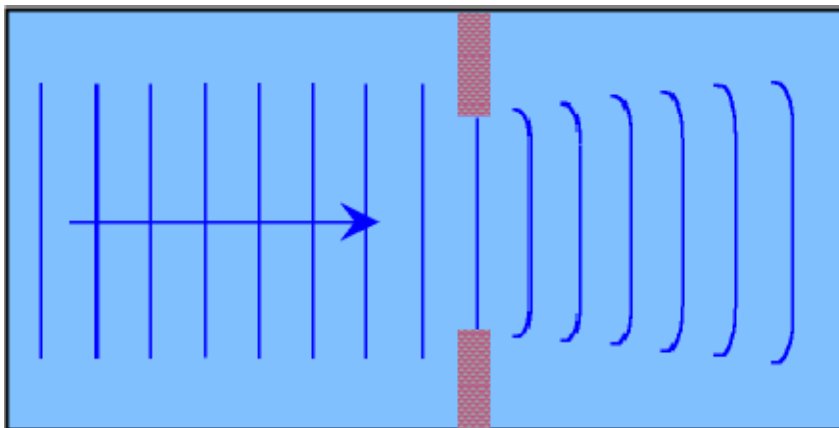
## Figura de Interferência de ondas



# DIFRAÇÃO

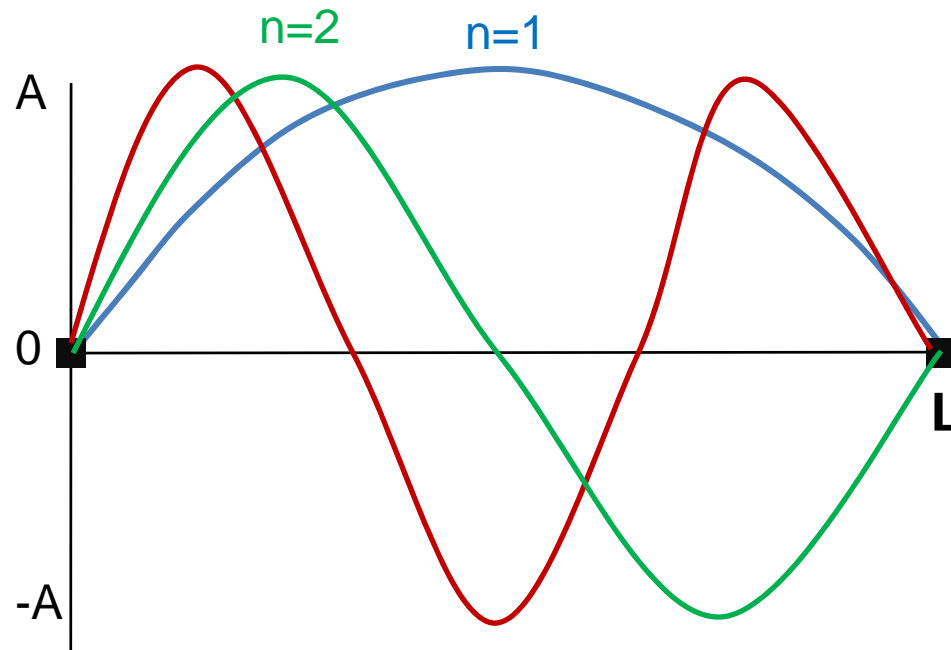


Se o **comprimento de onda é** da ordem de grandeza da abertura, a onda sofre **difracção**



Se o **comprimento de onda não é** comparável à abertura, apenas ocorre difracção diminuta nas bordas.

## Ondas Estacionárias



$$n=1 \rightarrow \lambda=2L$$

$$n=2 \rightarrow \lambda=L$$

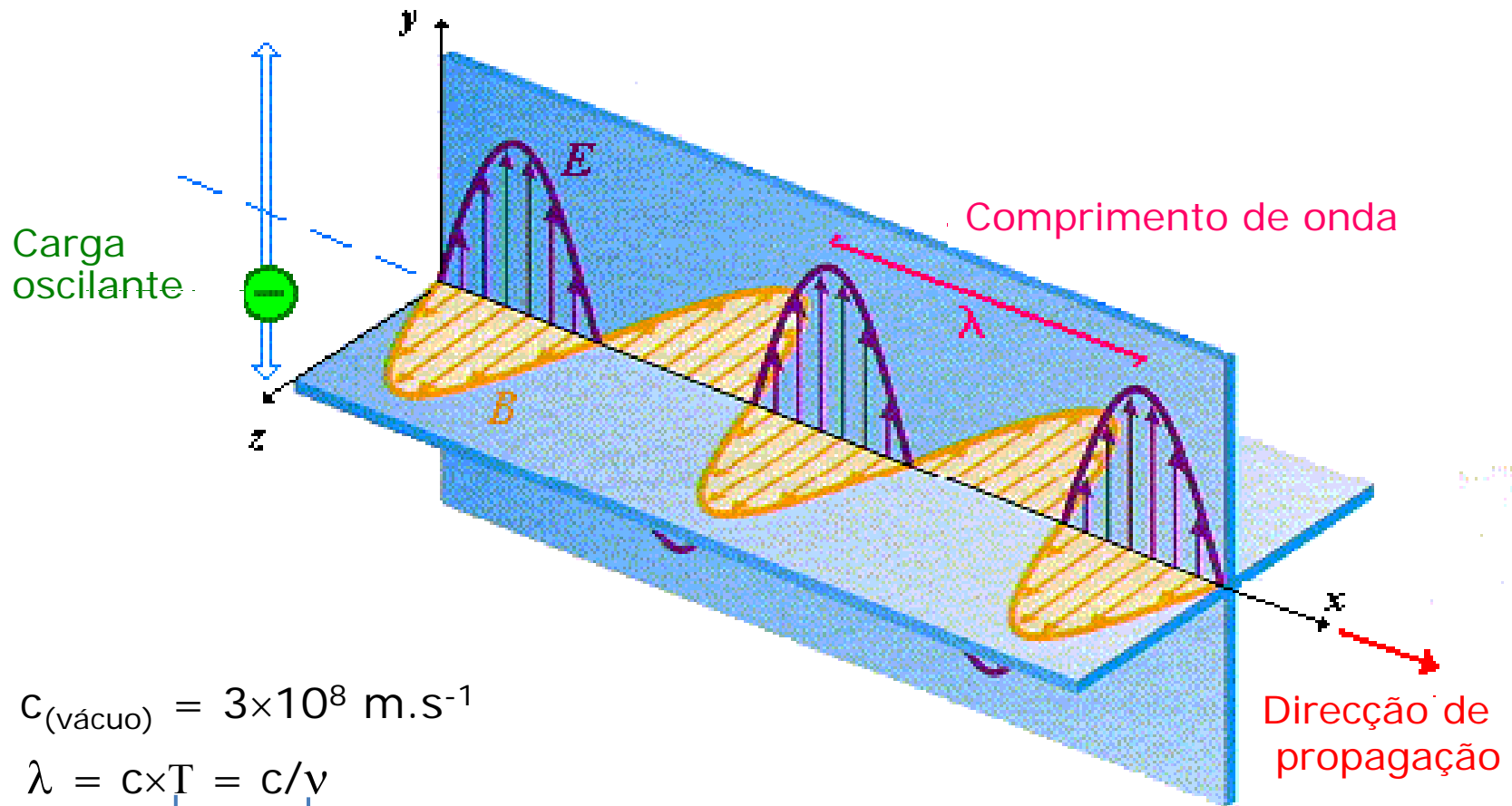
$$n=3 \rightarrow \lambda=2L/3$$

Se o comprimento total for  $L$ :

$\lambda$  pode ter apenas alguns valores: é quantificado

$$\lambda = 2L/n$$

# RADIAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA

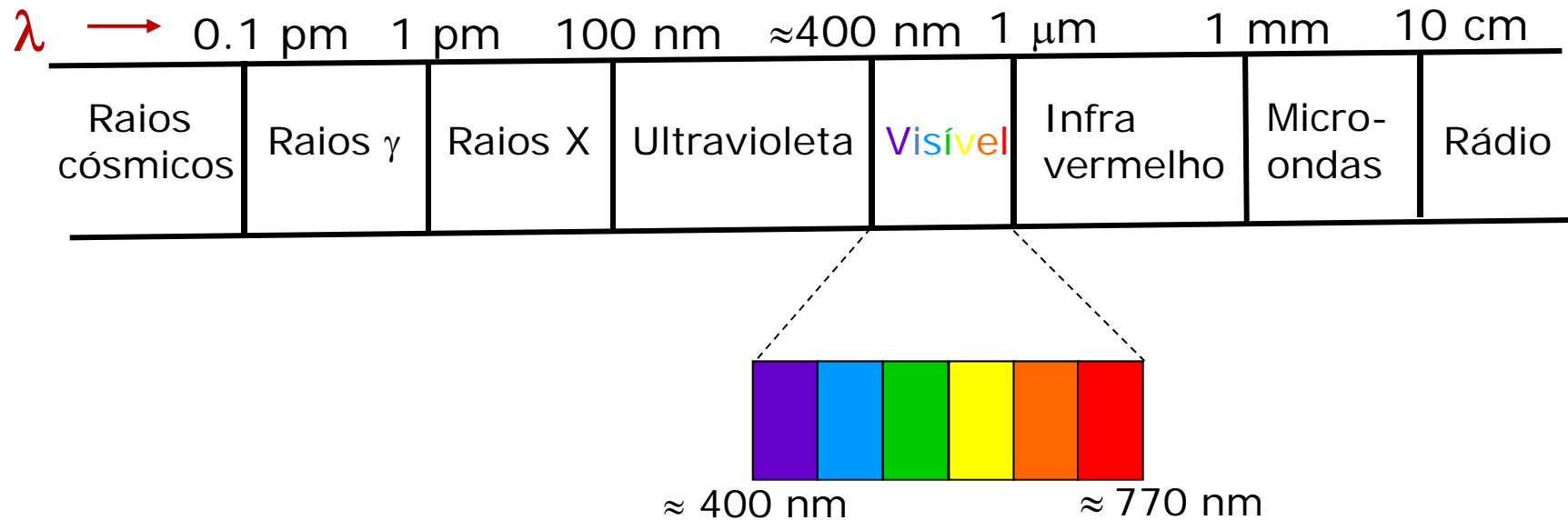


$$c_{(\text{v\u00e1cuo})} = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\lambda = c \times T = c / \nu$$

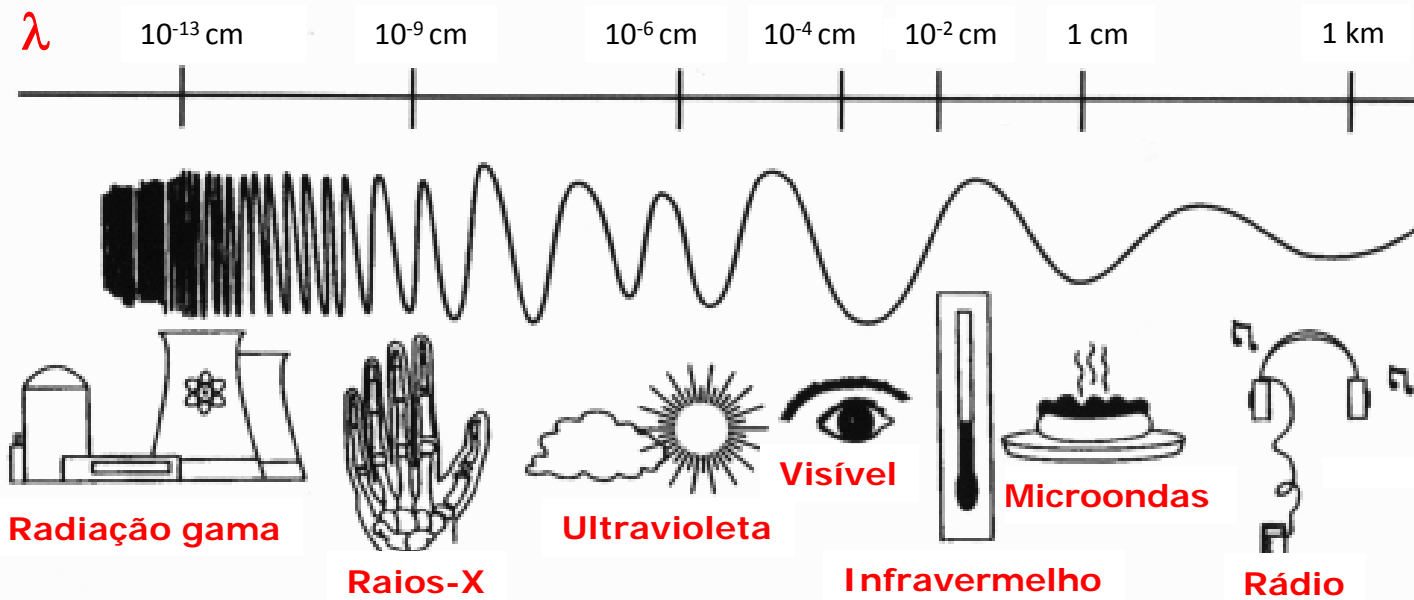
per\u00edodo      frequ\u00eancia

# ESPECTRO DA RADIAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA



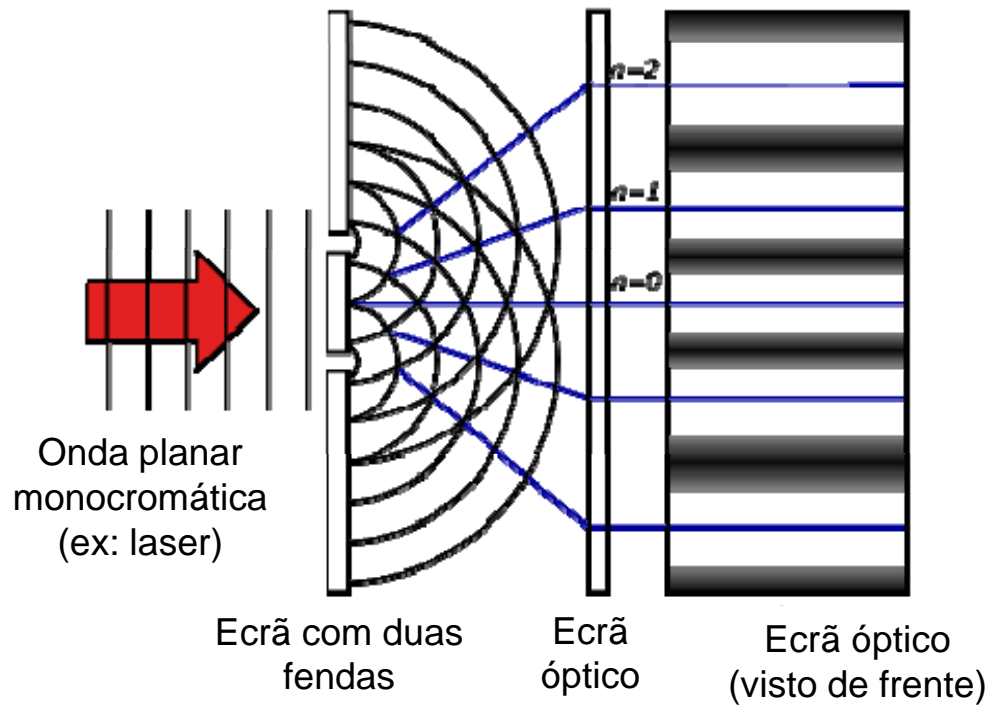
Frequência ( $\nu$ )  $\leftarrow$

## Espectro da radiação electromagnética

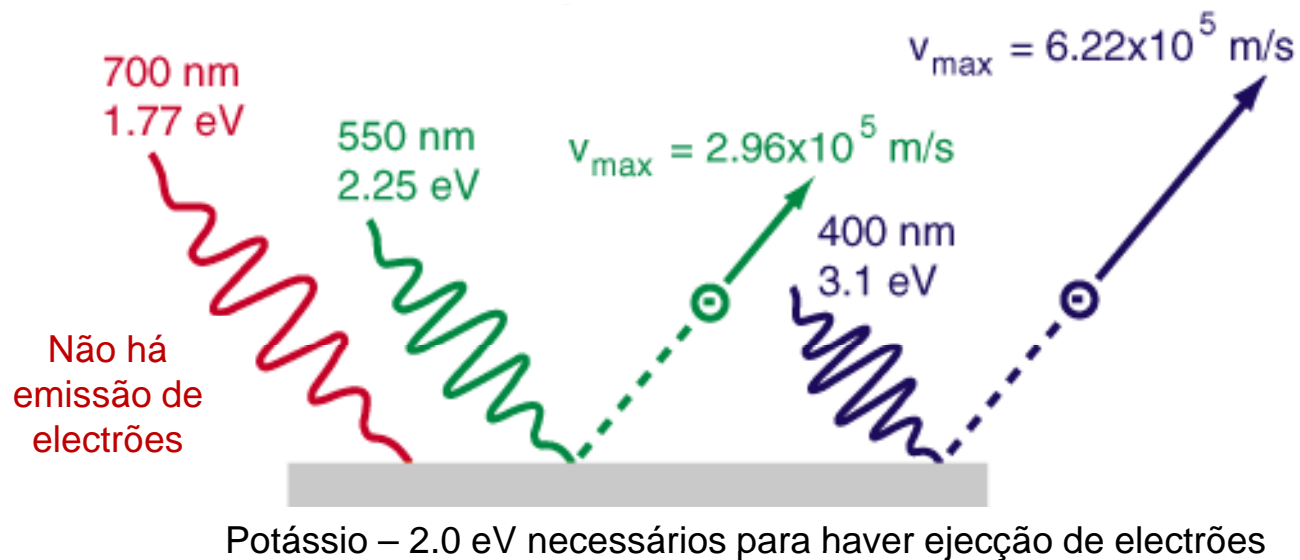




# FIGURAS DE DIFRAÇÃO

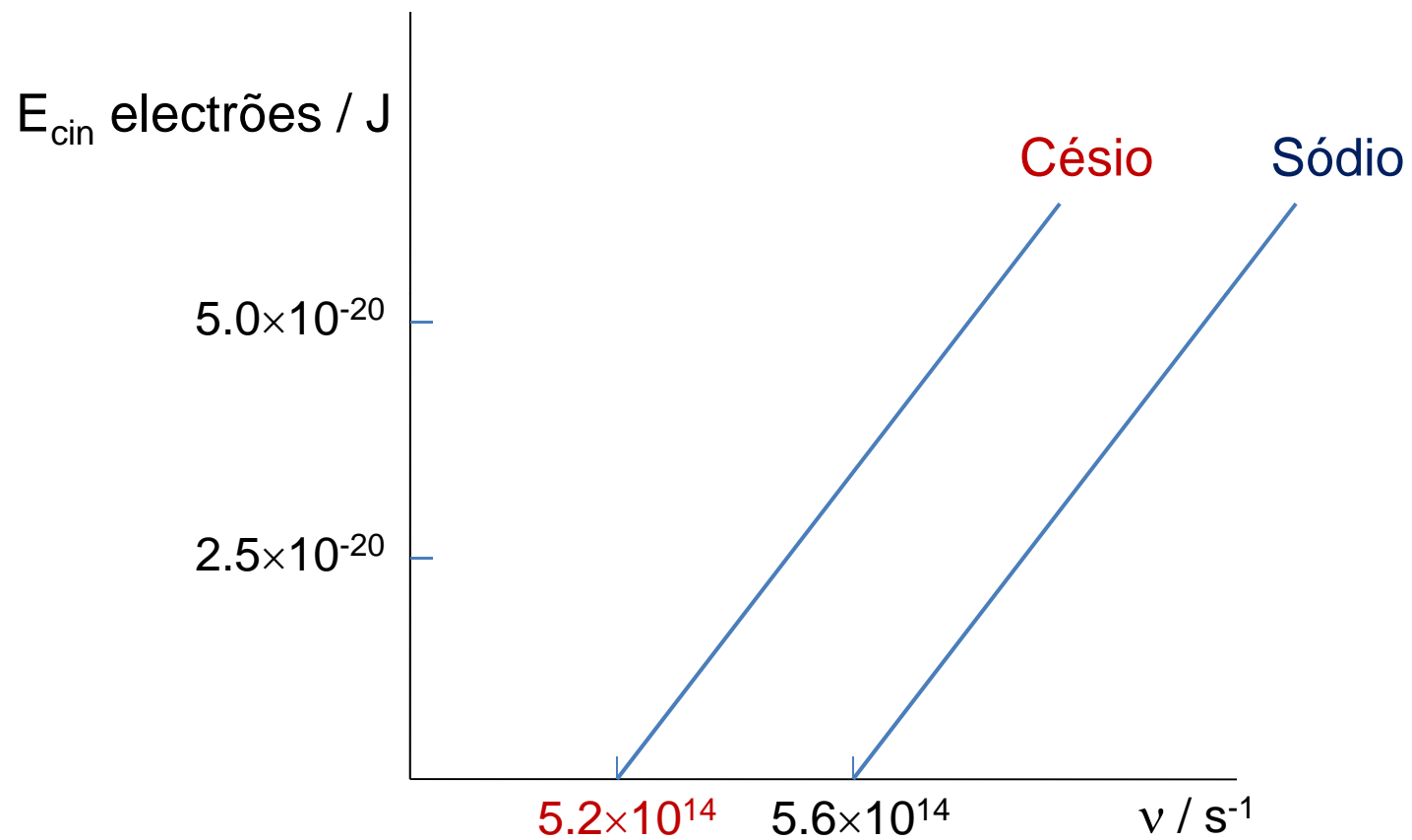


# CARÁCTER CORPUSCULAR DA LUZ



Descoberto por Heinrich Hertz em 1887

## EFEITO FOTOELÉCTRICO



# EFEITO FOTOELÉCTRICO

## OBSERVAÇÕES:

1. Haver ou não emissão de fotoelectrões depende da frequência da radiação incidente e não da intensidade do feixe: luz de baixa frequência não causa ejeção de electrões, qualquer que seja a intensidade;
2. Para luz acima de uma certa frequência:
  - a energia cinética dos fotoelectrões é proporcional à frequência da luz incidente;
  - o número de electrões ejectados é proporcional à intensidade da excitação.
3. Os electrões são emitidos imediatamente, sem atraso;

**Einstein (1905):** a energia do feixe incidente está concentrada em **quanta** de energia, e cada **quantum** ( $E=h\nu$ ) é transportado por um “corpúsculo” (fotão) e pode ser absorvido por um electrão.

$$h \text{ (constante de Planck)} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

## EFEITO FOTOELÉCTRICO

**Condição de emissão de fotoelectrões:**

$E_{\text{feixe}} > \text{Energia de ligação do electrão ao metal (W)}$

$$E_c = E_{\text{feixe}} - W = h\nu - W$$

$$E_c = \frac{1}{2}m_e v^2$$

## Dualismo onda-corpúsculo da luz

$$E = h\nu$$

$$E = mc^2$$

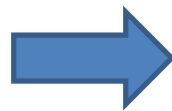
$$h\nu = mc^2$$

Como  $\nu = c/\lambda$

$$h\nu = hc/\lambda = mc^2$$

donde

$$h/\lambda = mc = p$$



$$\lambda = h/p$$

## Dualismo onda-corpúsculo da luz

Fenómeno	Pode ser explicado em termos de ondas	Pode ser explicado em termos de partículas
Reflexão	 ✓	 ✓
Refracção	 ✓	 ✓
Interferência	 ✓	 ✗
Difracção	 ✓	 ✗
Polarização	 ✓	 ✗
Efeito Fotoeléctrico	 ✗	 ✓

## Hipótese de Louis de Broglie (1923)

Extensão do dualismo onda-corpúsculo a qualquer partícula

$$\lambda = h/p$$

Por exemplo aos electrões, conhecidos desde 1897 (Thompson) :

$$m_e = 9.10953 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$$

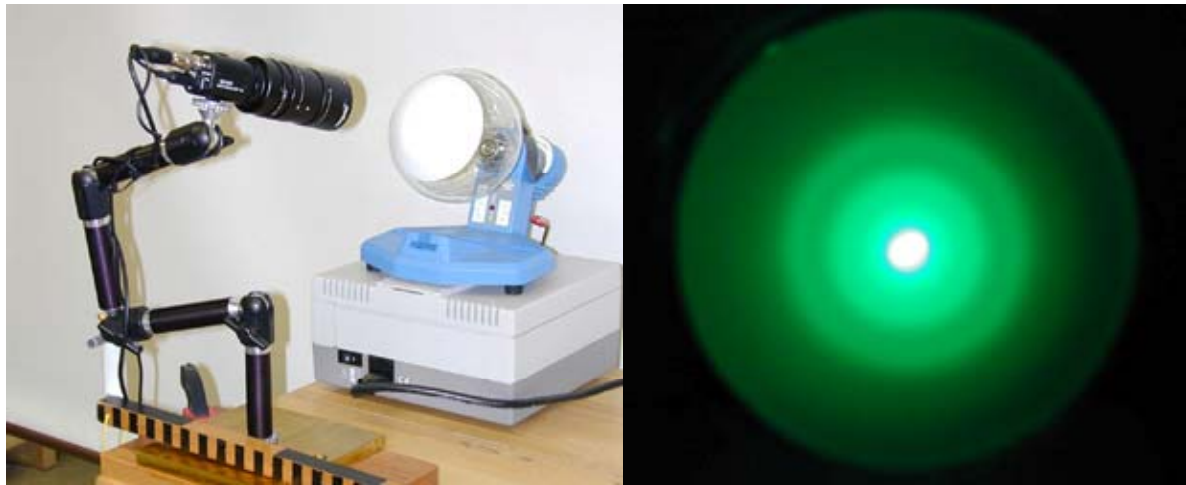
Se a partícula não é relativista,

$$\lambda = h/p = h/(mv) = h/\sqrt{2mE_c}$$



# DIFRAÇÃO DE ELECTRÕES

DAVIDSON e GERMER 1925



Hipótese de de Broglie → Relação de de Broglie:

$$\lambda = h/p = h/(mv)$$

para qualquer partícula de massa  $m$

## Características de uma onda estacionária:

- Os nodos e os ventres ocorrem sempre nos mesmos pontos;
- O comprimento de onda é quantificado:

$$\lambda = 2L/n \quad , \quad \text{com } n = 1, 2, 3, \dots$$

- $\psi(x,t)$  é a soma de duas funções de onda [ $\psi(x,t) = A \text{ sen}(Kx + \omega t)$ ] com o mesmo  $\lambda$  e a mesma  $v$ , deslocando-se em sentidos opostos:

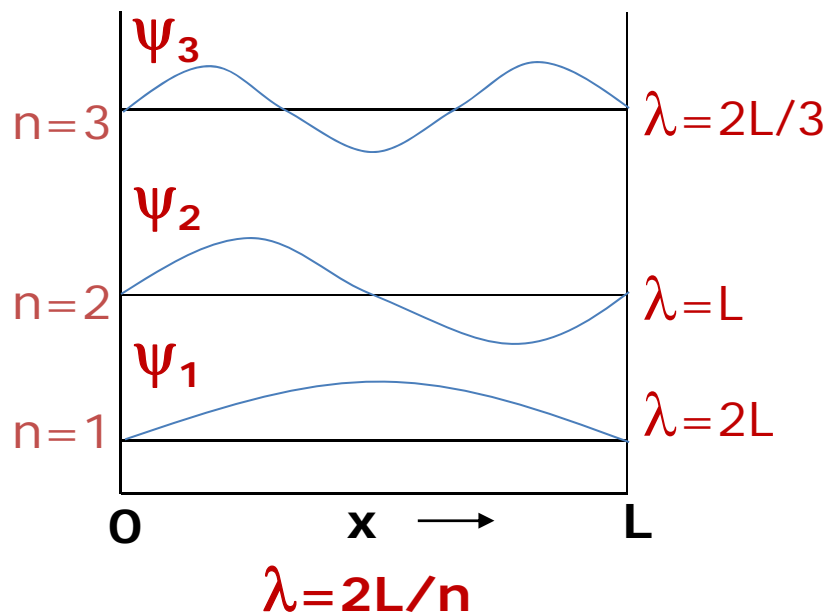
$$\psi(x,t) = A \text{ sen}(Kx + \omega t) + A \text{ sen}(Kx - \omega t)$$

$$= A [\text{sen}(Kx + \omega t) + \text{sen}(Kx - \omega t)]$$

$$= A [\text{sen}Kx \times 2 \times \cos\omega t]$$

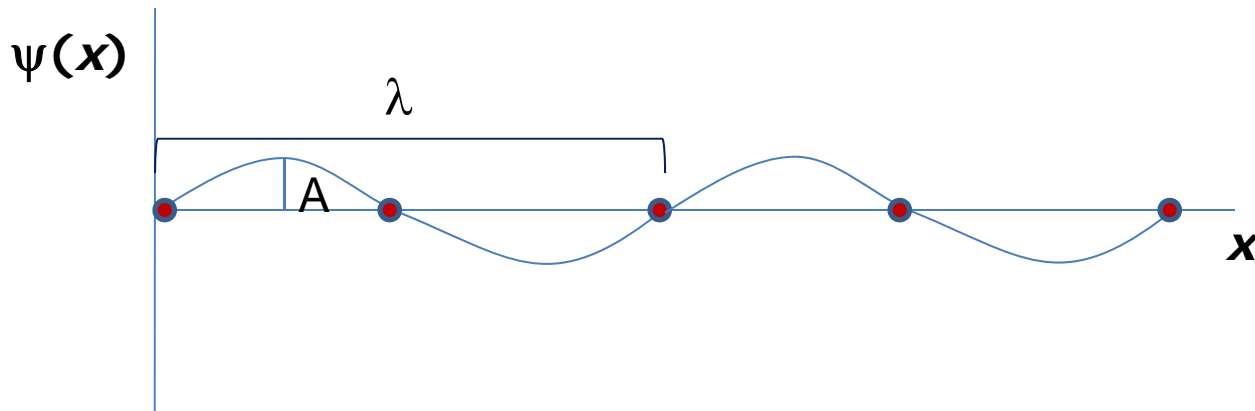
$$= \underbrace{A \text{ sen}Kx}_{\psi(x)} \times \underbrace{2 \times \cos\omega t}_{\varphi(t)}$$

A função de onda é o **produto** de duas funções, uma dependente apenas do **espaço** e outra apenas do **tempo**, que podem ser estudadas separadamente.



Estas funções obedecem a uma eq. muito simples (eq. de onda):  $\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -K^2 \psi(x)$

$$\psi(x) = A \text{ sen } Kx$$



### Cálculo do valor de K:

Num dado instante  $t$ , por exemplo  $t=0$ , os **nodos** da função de onda ocorrem para:

$x=0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2, \dots$  Ou seja:  $x=n\lambda/2$

Substituindo na função de onda:  $\psi(x) = A \text{ sen } (Kx) = A \text{ sen}(Kn\lambda/2) = 0$

Como  $A \neq 0$ ,  $\text{sen}(Kn\lambda/2) = 0$

Ou seja:  $Kn\lambda/2 = n\pi$

Donde:  $K = 2\pi/\lambda$

$K$  – vector de onda

$$\psi(x) = A \text{ sen}(2\pi x/\lambda)$$

Substituindo na equação de onda:

$$\begin{aligned}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} &= -K^2 \psi(x) \\ &= -\frac{4\pi^2}{\lambda^2} \psi(x)\end{aligned}$$

Pela relação de de Broglie para uma partícula não relativista:  $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}}$

$$\begin{aligned}\text{Substituindo na eq: } \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} &= -\frac{4\pi^2}{h^2} 2mE_c \psi(x) \\ &= -\frac{8\pi^2}{h^2} mE_c \psi(x)\end{aligned}$$

Donde:

$$E_c \psi(x) = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2}$$

*Erwin Schrödinger:*

$$E_c + E_p = E$$

$$E_c \cdot \psi(x) + E_p \cdot \psi(x) = E \cdot \psi(x)$$

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + E_p \cdot \psi(x) = E \cdot \psi(x)$$

Equação a uma dimensão ( $x$ ), independente do tempo, que traduz o comportamento de uma partícula descrita por uma onda (eq. de *Schrödinger*).

Resolvendo-a conhece-se a *função de onda*  $\psi(x)$  e a *energia da partícula*, ambas quantificadas.

## Sumário 2

- **Fenómenos Corpusculares**
- **Fenómenos Ondulatórios:**
  - Ondas Progressivas: Interferência, Difracção
  - Ondas Estacionárias: Quantificação:  $\lambda = 2L/n$
  - Equação Geral das Ondas (1 dimensão)
- **Carácter Corpuscular dos Fenómenos Ondulatórios (Fotão):**
  - Efeito Fotoelétrico
  - Equação de Planck:  $E = h\nu$
  - Relação Massa-Comprimento de onda
- **Carácter Ondulatório dos Fenómenos Corpusculares:**
  - Hipótese de De Broglie
  - Difracção de Electrões

## Sumário 2 – Cont.

- **Dualismo onda-corpúsculo:**
  - Relação de De Broglie:  $\lambda = h/p$
- **Consequências do Dualismo Onda-Corpúsculo**
  - Princípio de Incerteza de Heisenberg
- **Equação geral das ondas a uma dimensão**
- **Equação da Partícula-Onda (eq. de Schrödinger a 1 dimensão).**

**Teoria: Capítulo 1, pág. 1-17**  
**Exercícios: 1.1 – 1.7**