

FENÓMENOS CORPUSCULARES E ONDULATÓRIOS



Interferência de ondas

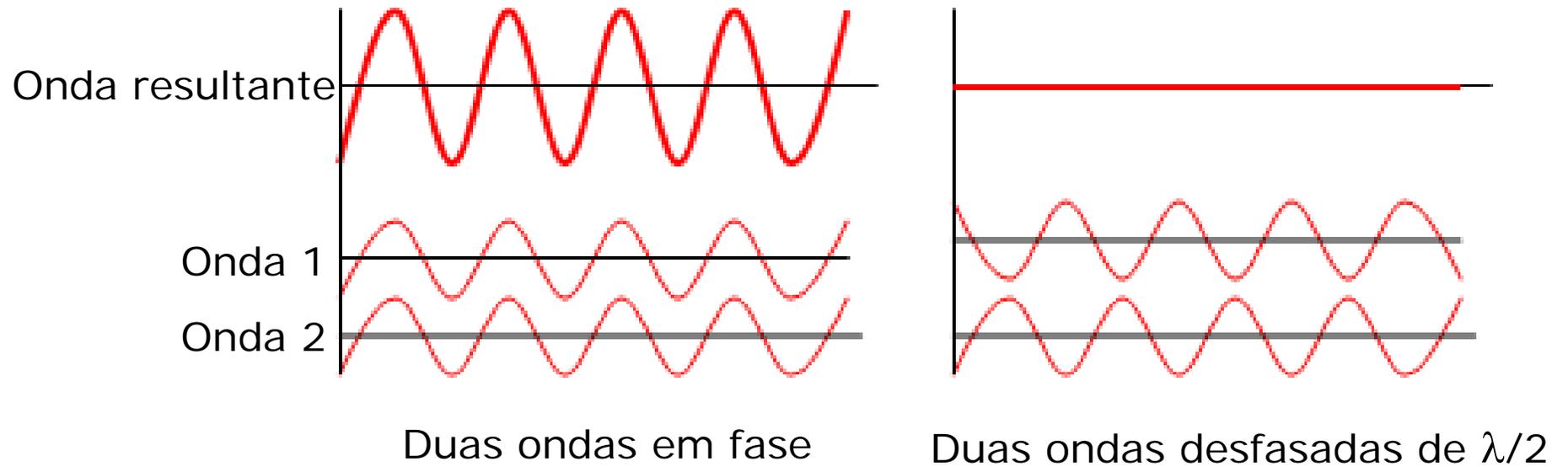
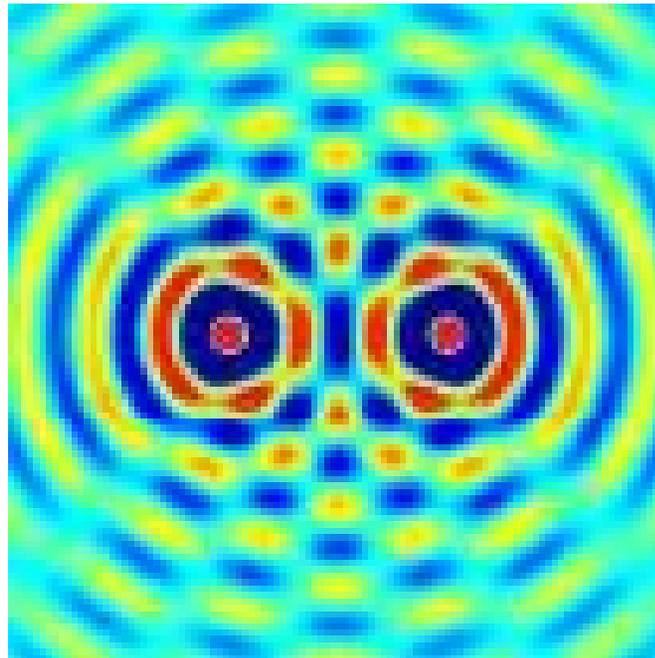
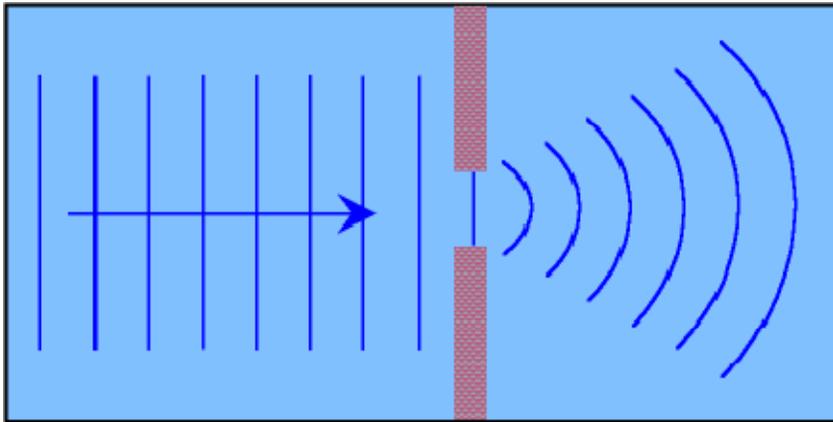


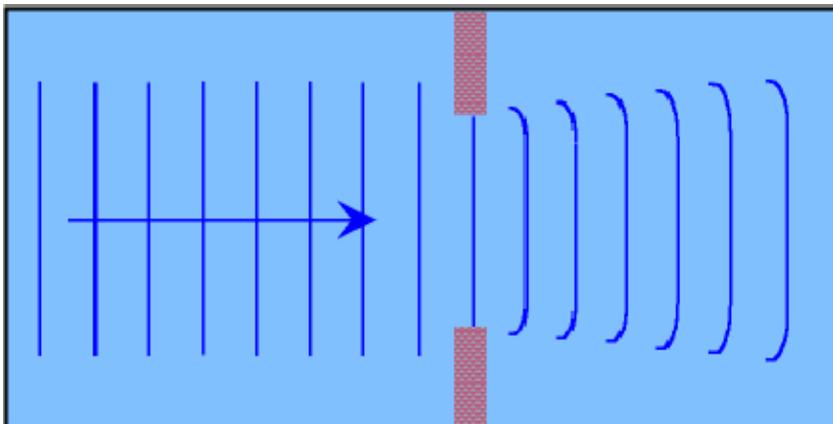
Figura de Interferência de ondas



DIFRAÇÃO

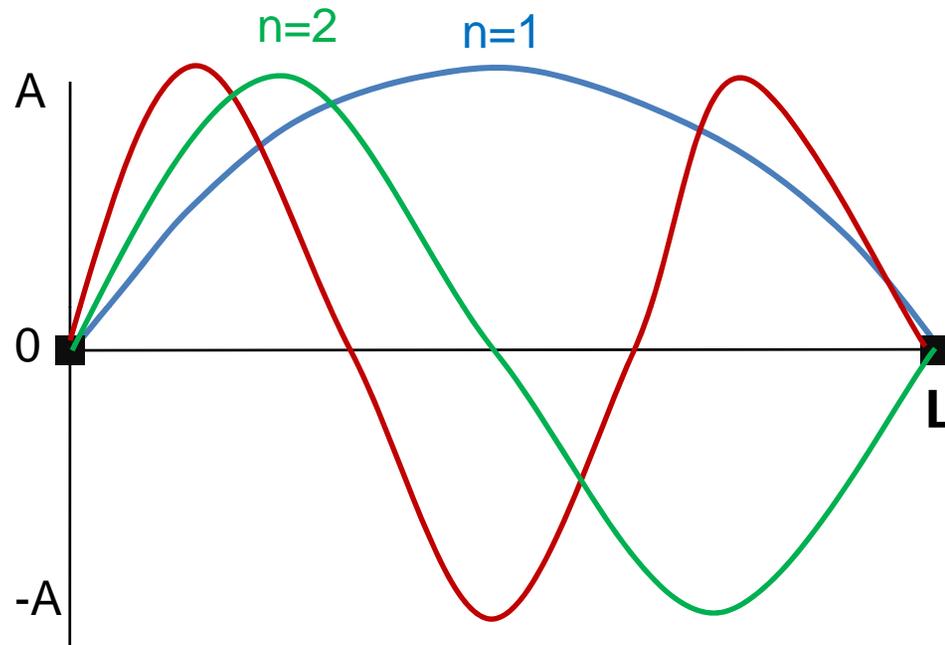


Se o **comprimento de onda é** da ordem de grandeza da abertura, a onda sofre **difracção**



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

Ondas Estacionárias



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

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

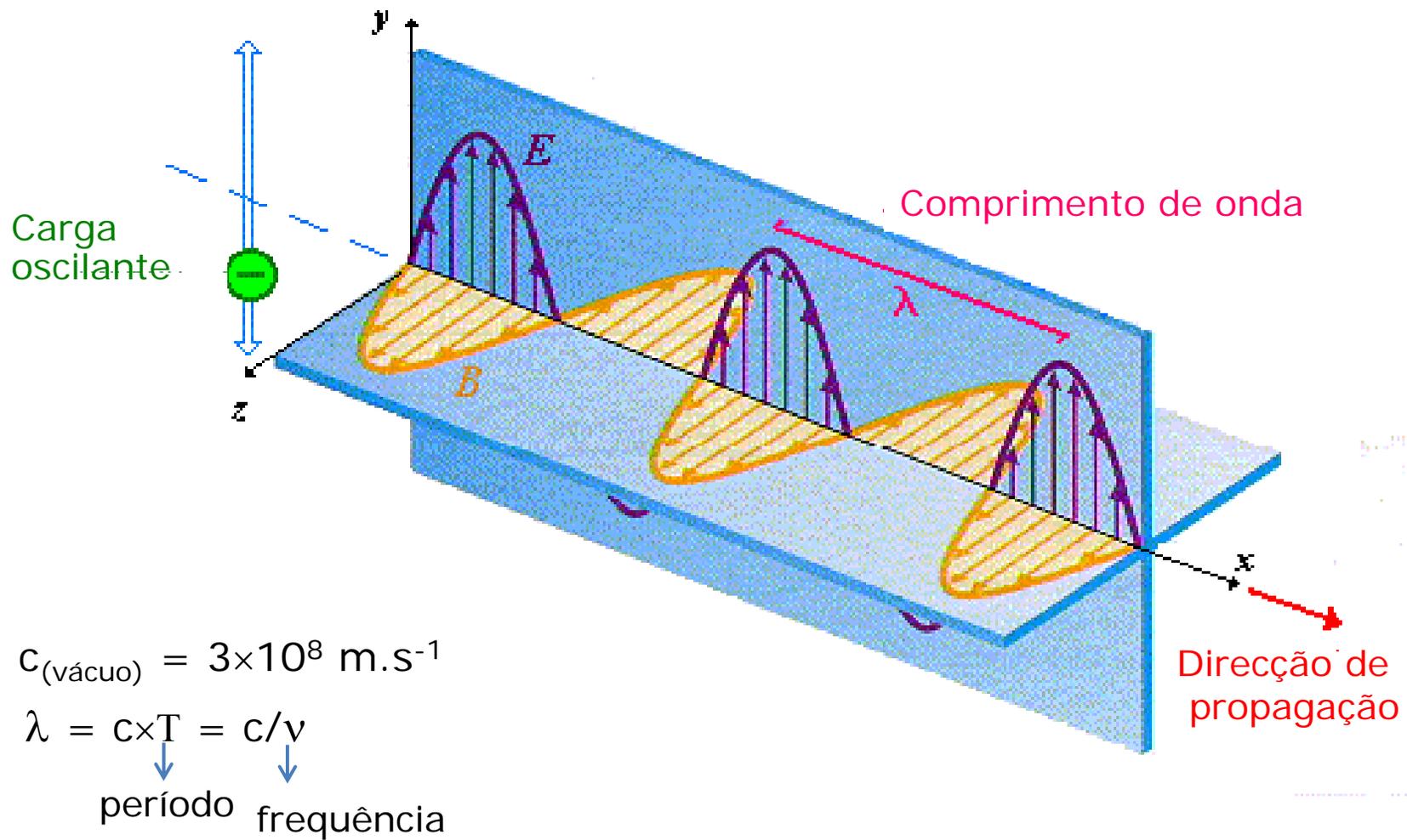
$$n=3 \rightarrow \lambda=2L/3$$

Se o comprimento total for L :

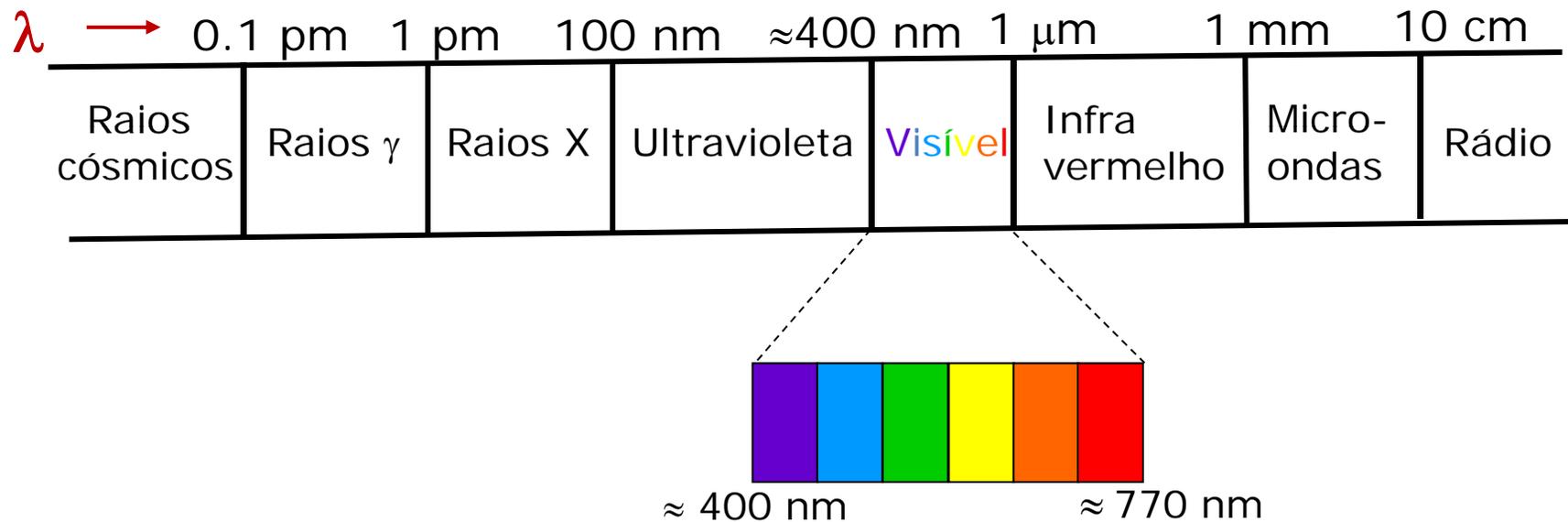
λ pode ter apenas alguns valores: **é quantificado**

$$\lambda=2L/n$$

RADIAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA

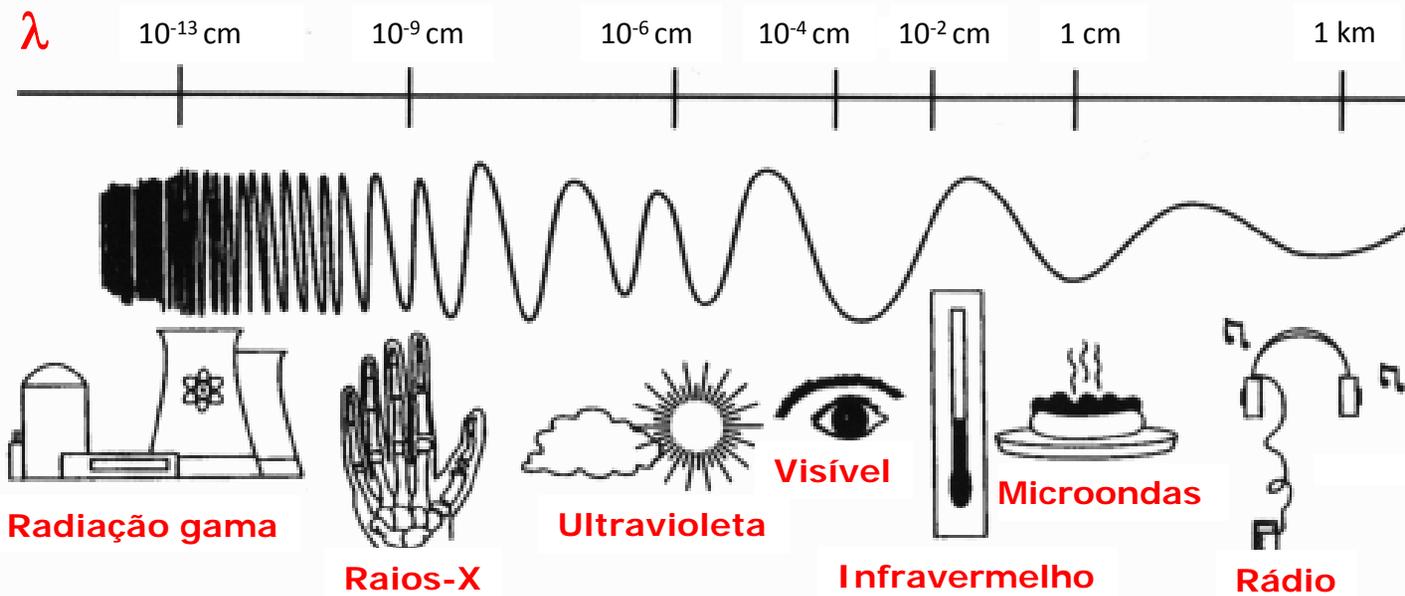


ESPECTRO DA RADIAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA

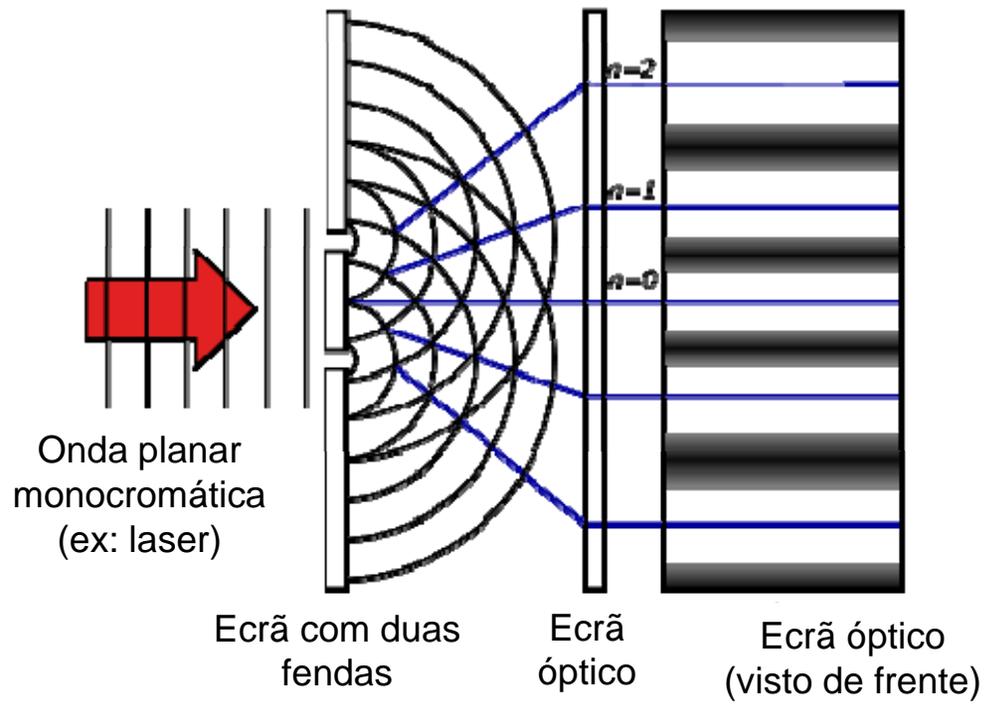


Frequência (ν) \leftarrow

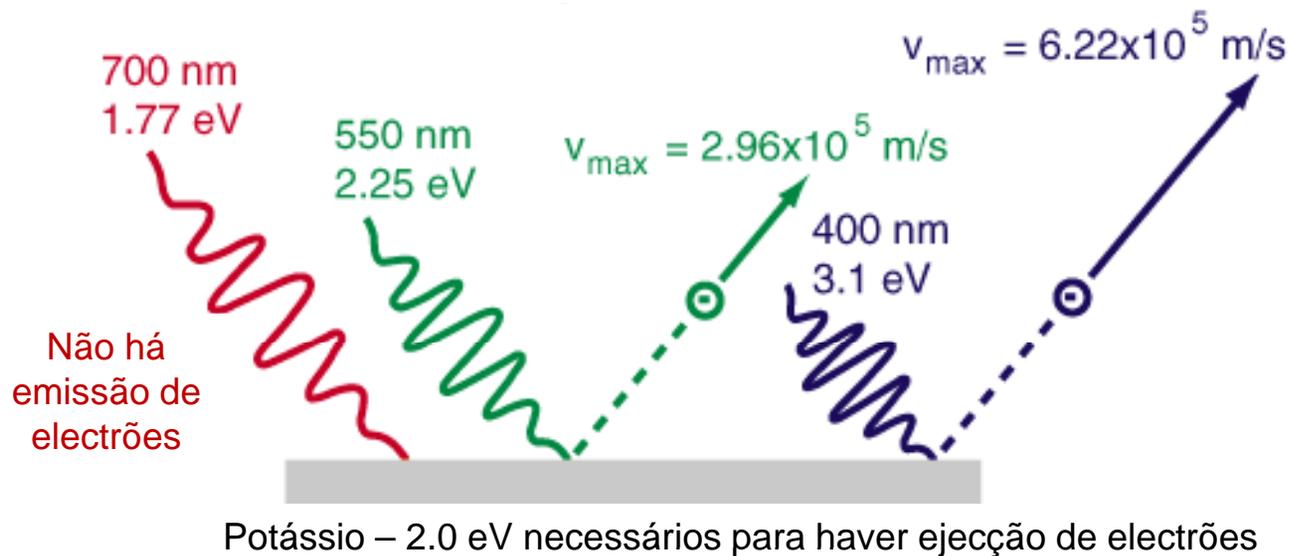
Espectro da radiação electromagnética



FIGURAS DE DIFRAÇÃO

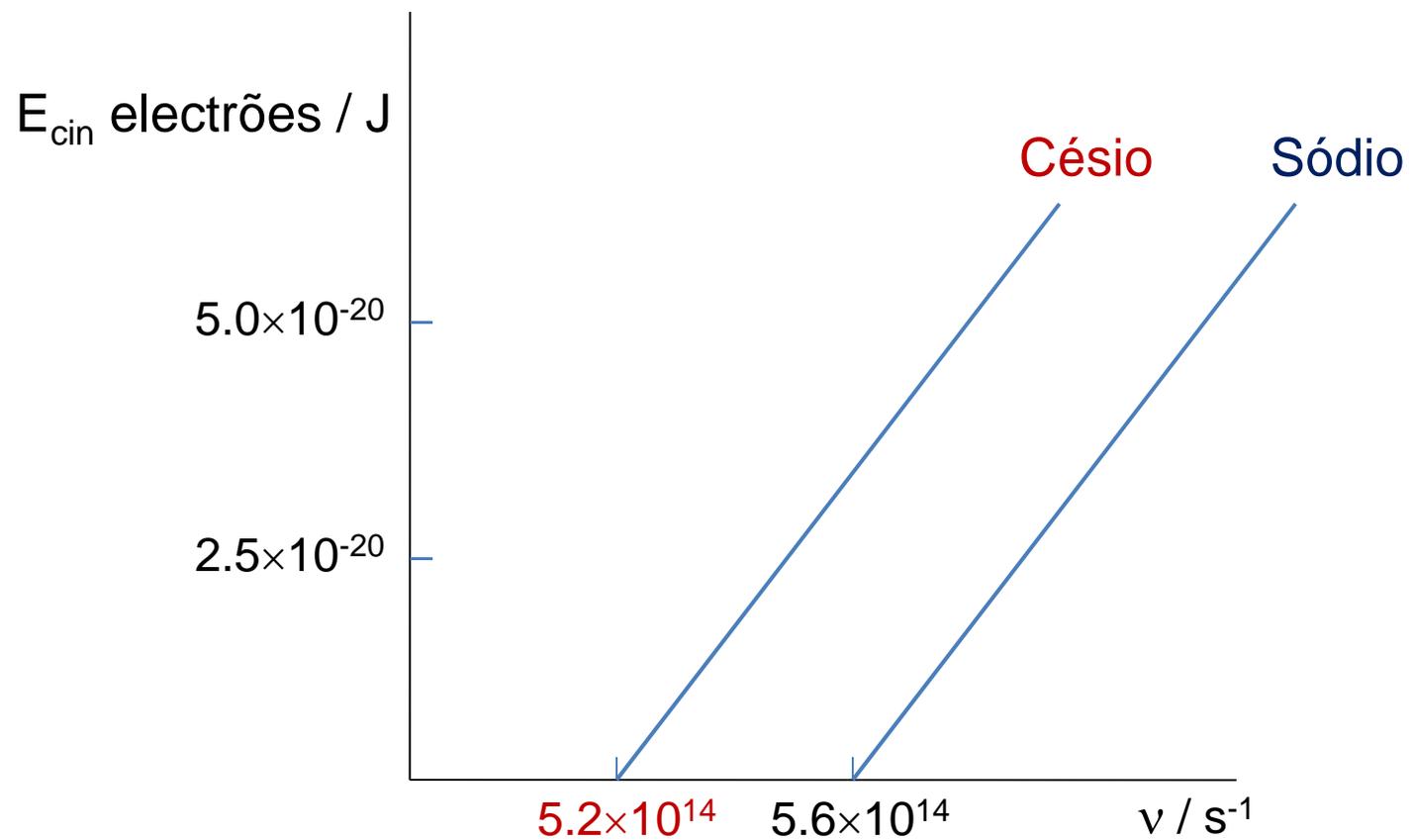


CARÁCTER CORPUSCULAR DA LUZ



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:

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

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

$$E_c = 1/2m_e v^2$$

Dualismo onda-corpúsculo da luz

$$E = h\nu$$

$$E = mc^2$$

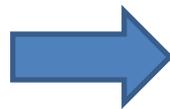
$$h\nu = mc^2$$

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) :

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

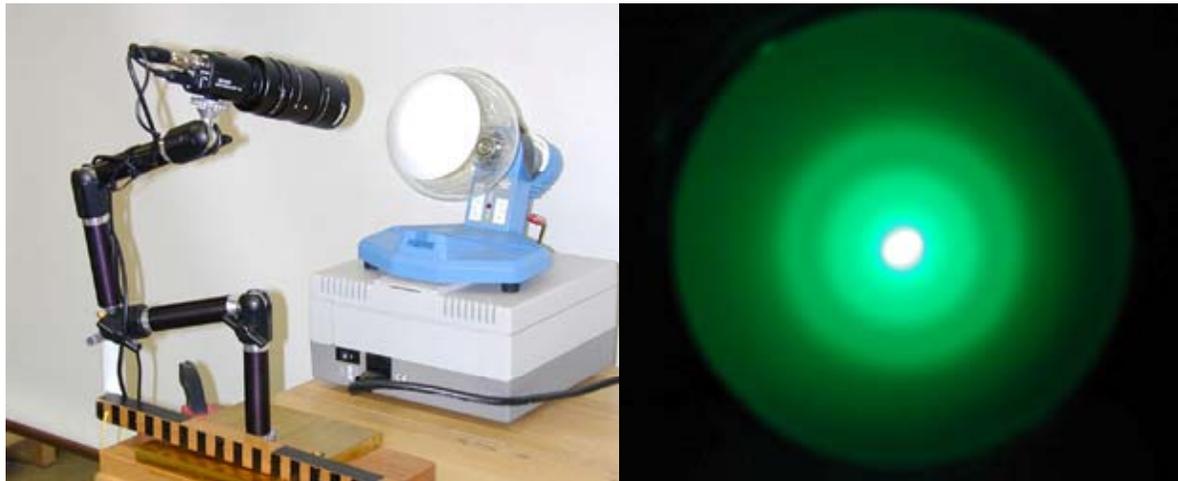
$$e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$$

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 λ e a mesma v , deslocando-se em sentidos opostos:

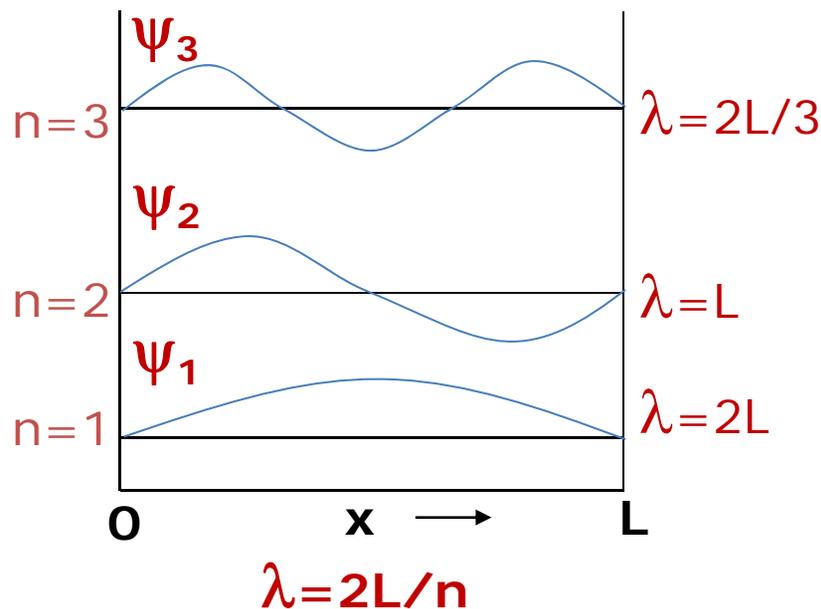
$$\psi(x,t) = A \text{ sen}(Kx + \omega t) + A \text{ sen}(Kx - \omega t)$$

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

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

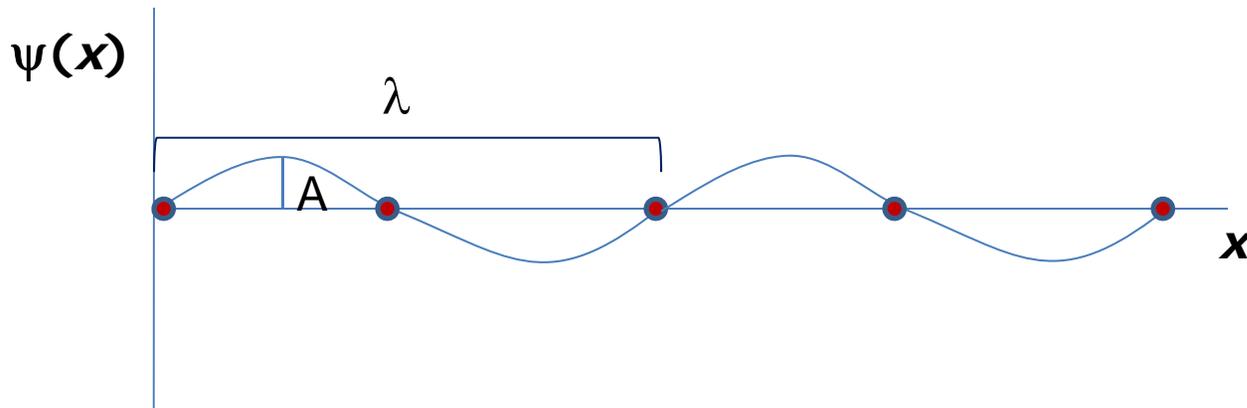
$$= \underbrace{A \text{ sen}Kx}_{\psi(x)} \times \underbrace{2 \times \cos\omega t}_{\varphi(t)}$$

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 Fotoeléctrico
 - 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