

**Semana 03**

# **Ondas Eletromagnéticas**

**Física III - Licenciatura**

**Prof. Henrique A. M. Faria**

---

# O que é a luz?

- Pergunta feita pelos seres humanos por séculos.
- A resposta mais consistente ocorreu com a **unificação da eletricidade com o magnetismo.**
- Concluiu-se que a luz é uma onda eletromagnética.
- Os **diversos tipos de ondas eletromagnéticas**, a luz visível, as ondas de rádio, os raios X e outras, diferem entre si pela frequência e pelo comprimento de onda.

# Ondas eletromagnéticas

- As **equações de Maxwell** mostraram que um campo magnético ( $\vec{B}$ ) variável funciona como fonte de campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e que um campo elétrico variável funciona como fonte de campo magnético.
- **Campos elétricos e magnéticos** podem se sustentar mutuamente, **formando uma onda eletromagnética** que se propaga através do espaço.

# Ondas eletromagnéticas

- Diferentemente das ondas em uma corda ou do som se propagando no ar, as ondas eletromagnéticas **não precisam de um meio material para se propagar.**
- Contudo, as ondas eletromagnéticas e as ondas mecânicas **possuem muitas características comuns** e são descritas com base na mesma linguagem.
- A equação que descreve esses dois tipos de ondas são iguais na forma.

# Ondas eletromagnéticas

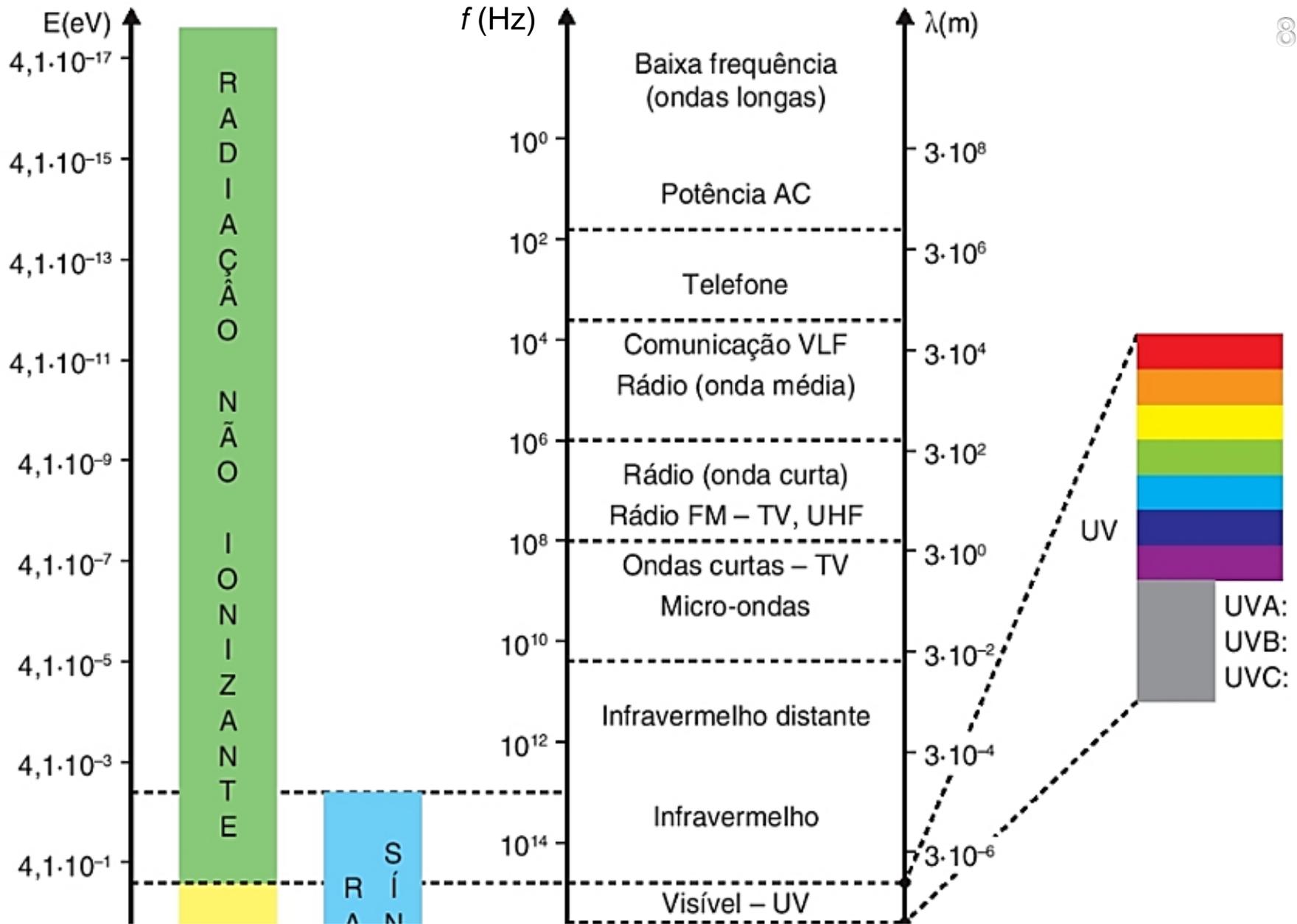
- **Maxwell provou, em 1865**, que uma perturbação eletromagnética poderia se propagar no espaço vazio com uma velocidade igual à velocidade da luz.
- Ele afirmou que a luz era, provavelmente, uma onda eletromagnética por natureza.
- Uma carga puntiforme que oscila com movimento harmônico simples poderia produzir as ondas eletromagnéticas.

# Ondas eletromagnéticas

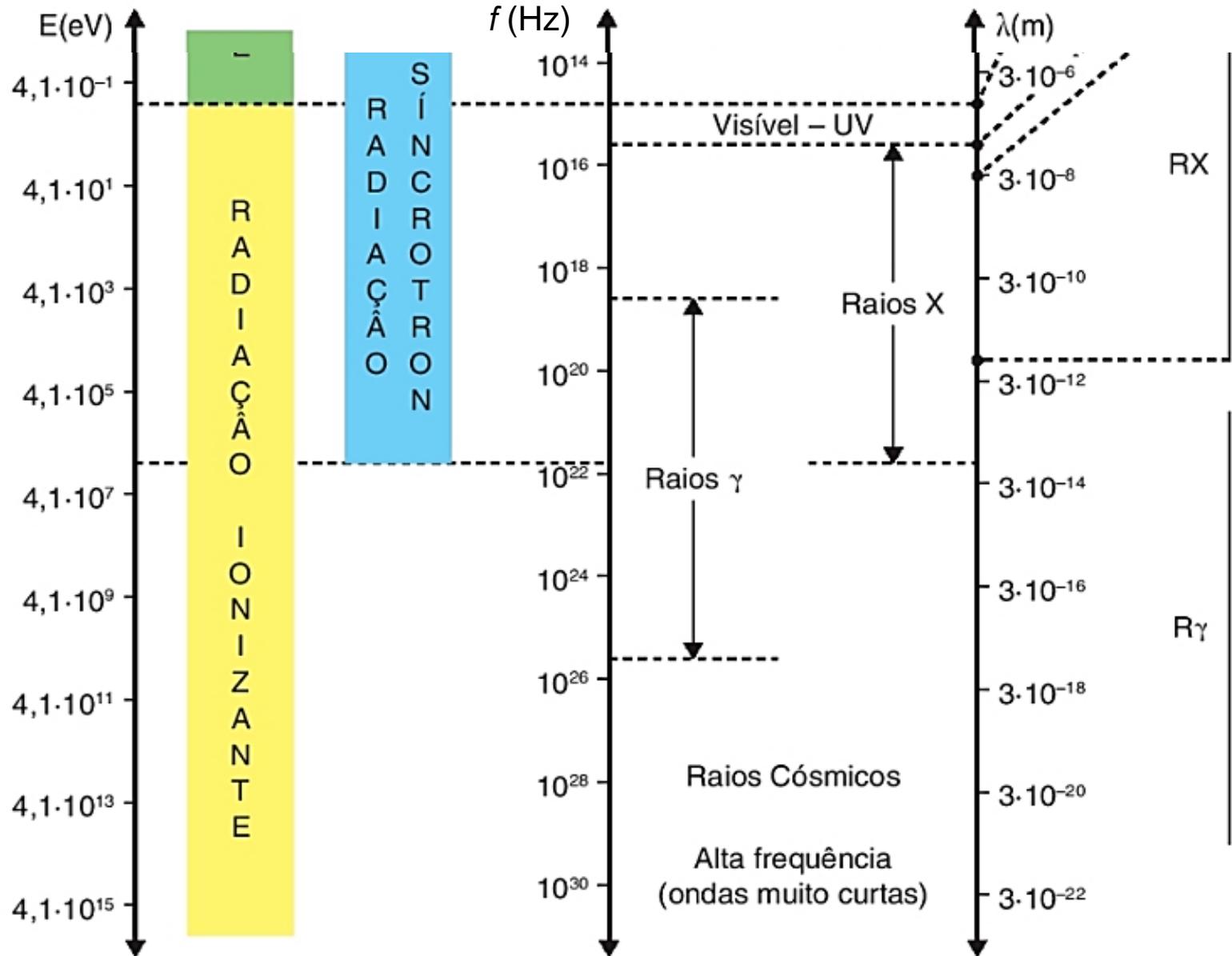
- **Heinrich Hertz produziu** em laboratório, **em 1887**, pela primeira vez ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda macroscópicos.
- Ele usou cargas oscilando em **circuitos LC**.
- Determinou a **velocidade da onda** usando a relação entre comprimento de onda e frequência,  $v = \lambda f$ .
- Verificou que a velocidade da onda eletromagnética era igual à velocidade da luz.
- O valor atual da **velocidade da luz (c)** é igual a  $299.792.458 \text{ m/s} \cong 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

# Ondas eletromagnéticas

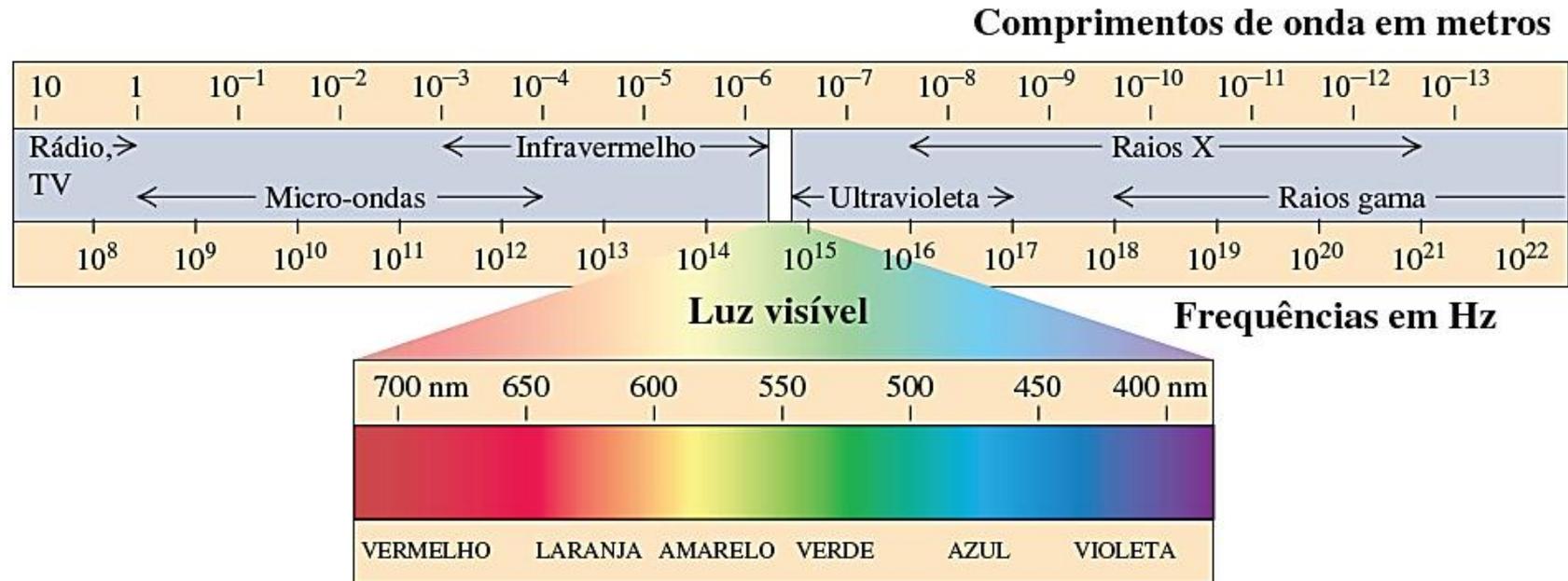
- Ondas de **rádio**, ondas **luminosas**, raios **infravermelhos**, raios **ultravioletas**, raios **x** e raios **gama** são exemplos de **ondas eletromagnética** (ou radiação eletromagnética).
- O **espectro eletromagnético** com relação à frequência ou ao comprimento de onda pode ser subdividido em **duas partes**:
  - **Radiação não ionizante.**
  - **Radiação ionizante.**



Espectro eletromagnético - Fonte: Duran, 2011, p. 364.



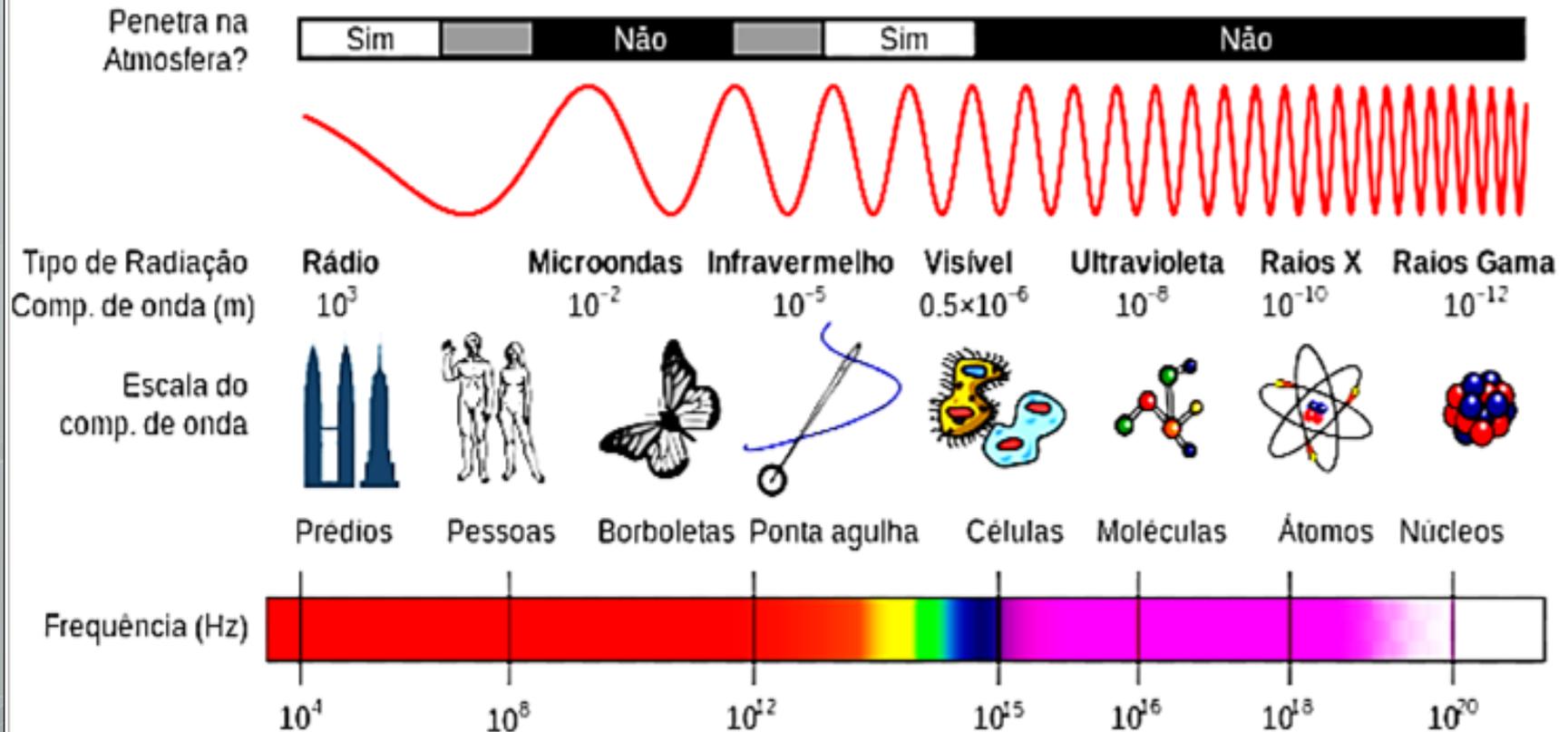
# Espectro eletromagnético



Comprimentos  
de onda

De 380 a 450 nm	Violeta
De 450 a 495 nm	Azul
De 495 a 570 nm	Verde
De 570 a 590 nm	Amarelo
De 590 a 620 nm	Laranja
De 620 a 750 nm	Vermelho

# Espectro eletromagnético



# Propriedades das ondas eletromagnéticas

1. A onda é transversal, tanto  $\vec{E}$  quanto  $\vec{B}$  são **perpendiculares à direção de propagação** da onda.
2. A razão entre o módulo de  $\vec{E}$  e de  $\vec{B}$  é constante:  **$E/B = c$ .**
3. A onda se desloca no vácuo com uma **velocidade (c) definida e invariável.**
4. A onda eletromagnética **não necessita de nenhum meio** para se propagar.

# Simulador de ondas

1. Acesse o simulador de ondas no módulo Luz.

[https://phet.colorado.edu/sims/html/waves-intro/latest/waves-intro\\_pt\\_BR.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/waves-intro/latest/waves-intro_pt_BR.html)

2. Experimente alterar as frequências e observar a oscilação do campo elétrico.
3. Observe as relações da amplitude e comprimento de onda.
4. Explore os demais recursos do simulador.

# Ondas Eletromagnéticas senoidais

# Ondas eletromagnéticas senoidais

- As **ondas eletromagnéticas senoidais** são análogas às ondas mecânicas transversais em uma corda esticada.
- Os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  em qualquer ponto do espaço são **funções senoidais do tempo**.
- O conjunto se desloca na direção e no sentido de propagação da onda com velocidade  $c$  no vácuo.
- As direções de  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  são perpendiculares à direção de propagação da onda (mutuamente perpendiculares), e **a onda é transversal**.

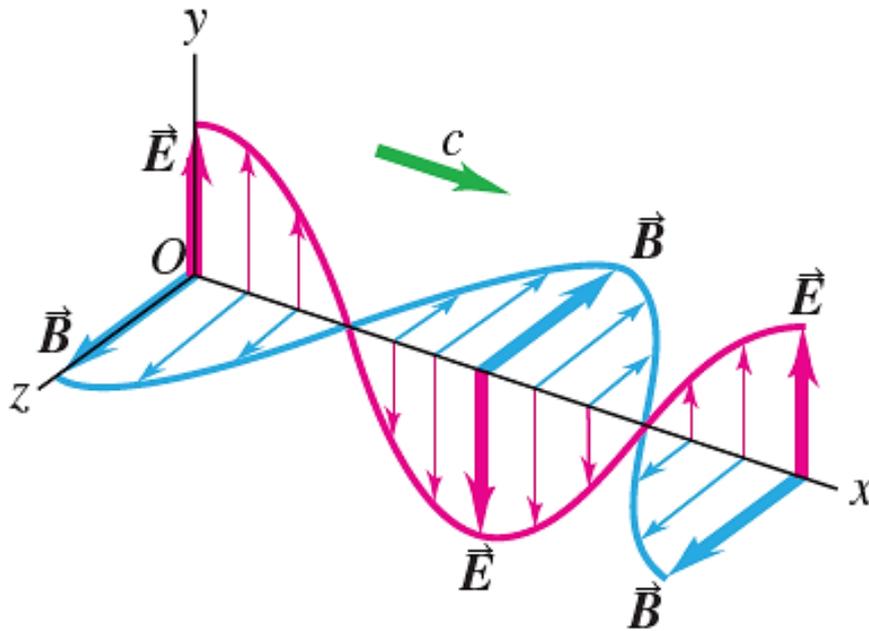
# Ondas eletromagnéticas senoidais

- A frequência  $f$ , o comprimento de onda  $\lambda$  e a velocidade  $c$  de propagação da onda são relacionados pela equação usual  $c = \lambda f$ .

**Exemplo:** onda de rádio FM

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10^8 \text{ Hz}} = 3 \text{ m}$$

# Ondas eletromagnéticas senoidais



A onda se desloca no sentido positivo do eixo  $Ox$ .

$\vec{E}$ : somente componente  $y$

$\vec{B}$ : somente componente  $z$

# Ondas eletromagnéticas senoidais

- Uma onda eletromagnética pode ser descrita por uma função de onda da forma:

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

$y(x, t)$  é o deslocamento transversal, a partir do equilíbrio, de um ponto em  $x$  para um instante  $t$ .

$A$  é o deslocamento máximo ou amplitude da onda.

$\omega$  é sua frequência angular ( $\omega = 2\pi f$ ).

$k$  é o número de onda, igual a ( $k = 2\pi/\lambda$ ).

# Ondas eletromagnéticas senoidais

- Escrevendo os campos elétrico e magnético nesta forma de onda tem-se uma onda eletromagnética senoidal propagando-se no sentido  $Ox$ .

Campo elétrico      Módulo do campo elétrico      Número de onda  
 $\vec{E}(x, t) = \hat{j}E_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t)$   
 Campo magnético      Módulo do campo magnético      Frequência angular  
 $\vec{B}(x, t) = \hat{k}B_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t)$

$$E_{\text{máx}} = cB_{\text{máx}}$$

## Exemplo 32.1

Um *laser* de dióxido de carbono emite ondas eletromagnéticas senoidais que se propagam no vácuo no sentido negativo do eixo  $Ox$ .

O comprimento de onda  $\lambda$  é igual a  $10,6 \mu\text{m}$  (infravermelho) e o **campo**  $\vec{E}$  é paralelo ao eixo  $Oz$  e seu módulo máximo é  $1,5 \text{ MV/m}$ .

Escreva as equações vetoriais para  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  em função do tempo e da posição.

# Exemplo 32.1

$$\vec{E}(x, t) = \hat{k}E_{\text{máx}} \cos(kx + \omega t) \quad \vec{B}(x, t) = \hat{j}B_{\text{máx}} \cos(kx + \omega t)$$

$$B_{\text{máx}} = \frac{E_{\text{máx}}}{c} = \frac{1,5 \times 10^6 \text{ V/m}}{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ T}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \text{ rad}}{10,6 \times 10^{-6} \text{ m}} = 5,93 \times 10^5 \text{ rad/m}$$

$$\begin{aligned} \omega &= ck = (3,00 \times 10^8 \text{ m/s}) (5,93 \times 10^5 \text{ rad/m}) \\ &= 1,78 \times 10^{14} \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\vec{E}(x, t) = \hat{k}(1,5 \times 10^6 \text{ V/m}) \cos[(5,93 \times 10^5 \text{ rad/m})x + (1,78 \times 10^{14} \text{ rad/s})t]$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{j}(5,0 \times 10^{-3} \text{ T}) \cos[(5,93 \times 10^5 \text{ rad/m})x + (1,78 \times 10^{14} \text{ rad/s})t]$$

# Ondas eletromagnéticas na matéria

- As ondas eletromagnéticas **também podem se propagar na matéria** (fluidos ou sólidos).
- A análise já realizada pode ser estendida para sólidos ou fluidos dielétricos (não condutores).
- Em um **dielétrico**, a velocidade de propagação da onda **não é a mesma velocidade no vácuo**, iremos designá-la por  $v$  em vez de  $c$ .
- Utilizaremos as grandezas  $K$  (constante dielétrica),  $\epsilon$  (Permissividade do dielétrico) e  $\mu$  (permeabilidade do meio) nas relações fundamentais.

# Ondas eletromagnéticas na matéria

- A velocidade da onda no meio dielétrico é:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{K K_m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{K K_m}}$$

- Para quase todos os dielétricos a permeabilidade relativa  $K_m = 1$ , então as expressões ficam:

$$v = \frac{1}{\sqrt{K}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{K}}$$

- Como  $K$  é sempre maior que 1, a **velocidade** da onda eletromagnética **em um dielétrico é sempre menor** que a velocidade no vácuo  $c$ .

# Exemplo

O valor da constante dielétrica  $K$  da água é 1,8 (quando os campos variam com a frequência) para luz visível. Qual é a velocidade da luz visível na água?

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}} = \frac{3,0 \times 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]}{\sqrt{1,8}} = 2,23 \times 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$v \cong 75\% c$$

# Energia em ondas eletromagnéticas

- As ondas eletromagnéticas são **ondas progressivas** que **transportam energia** de uma região para outra.
- A **energia solar** é um exemplo bem conhecido deste transporte de energia.
- Algumas **aplicações** práticas dessa energia ondulatória são fornos de micro-ondas, transmissores de rádio e cirurgias oculares a *laser*.

# Energia em ondas eletromagnéticas

- O fluxo de energia por unidade de tempo e por unidade de área  $\left[\frac{J}{s \cdot m^2}\right] = \left[\frac{W}{m^2}\right]$ , é designado por  $S$ :

$$S = \frac{1}{A} \frac{dU}{dt} = \varepsilon_0 c E^2 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} E^2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E^2 = \frac{EB}{\mu_0}$$

- Essa grandeza denomina-se **vetor de Poyting**, e é escrita vetorialmente por:

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

$$\text{pois: } E = \frac{B}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

## Exemplo 32.3

Para uma onda plana, com  $E = 100 \text{ V/m} = 100 \text{ N/C}$ . Calcule o valor de  $B$  e o módulo da taxa do fluxo de energia  $S$  por unidade de área.

$$B = \frac{E}{c} = \frac{100 \left[ \frac{\text{V}}{\text{m}} \right]}{3,0 \times 10^8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} = 3,33 \times 10^{-7} \text{ [T]}$$

$$S = \frac{EB}{\mu_0} = \frac{100 \left[ \frac{\text{V}}{\text{m}} \right] (3,33 \times 10^{-7} \text{ [T]})}{3,0 \times 10^8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} = 26,5 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

# Para depois desta aula

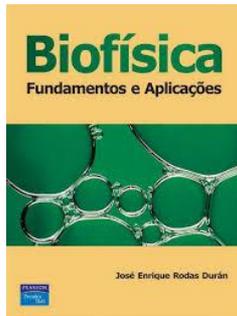
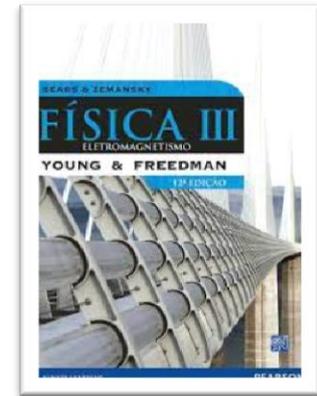
- Completar estudo com a leitura dos tópicos do capítulo 32 do livro texto (v.III Sears e Zemansky);
- Acessar Lista exercícios no site:

[profhenriquefaria.com](http://profhenriquefaria.com)

**Obrigado pela atenção!**  
**E bons estudos.**

# Referências

1. YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Sears e Zemansky Física III: Eletromagnetismo. 12 ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.



2. DURAN, J.E.R. **Biofísica. Fundamentos e Aplicações.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.