

# Aula 2 - Ondas Eletromagnéticas

Física 4

Ref. Halliday – Volume 4

---

---

# Sumário

- ❖ **Introdução – ondas eletromagnéticas**
- ❖ **Descrição Qualitativa de uma Onda Eletromagnética**
- ❖ **Descrição Matemática de uma Onda Eletromagnética**

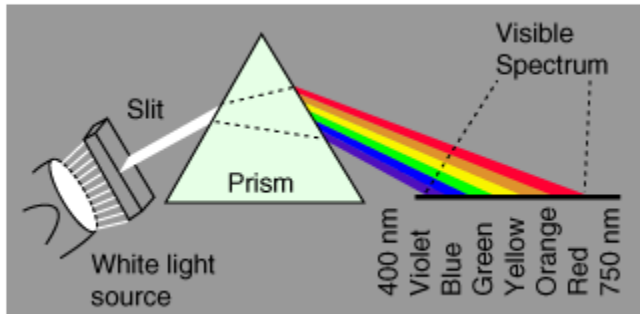
---

# Relembrando

- ❖ **No estudo sobre Equações de Maxwell é exposto que...**
- ❖ Quando os campos (elétrico e magnético) não variam com o tempo podemos analisar os campos elétricos e magnéticos separadamente (ex. carga elétrica em repouso que produz um campo elétrico, ou campos magnéticos gerados por correntes estacionárias) ;
- ❖ Porém, quando um campo elétrico ou magnético está variando com o tempo, ocorre uma indução do outro campo na região do espaço adjacente ao campo que está variando;
- ❖ Se não existir nenhuma perturbação, essa interação resulta numa característica de onda e por isso denominamos esta como, Onda Eletromagnética;

# Um pouco de história....

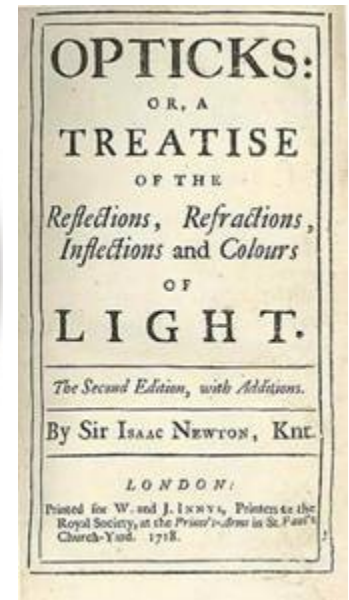
**Teoria corpuscular:** proposta por Newton - seus experimentos com prismas considerava a luz era formada por corpúsculos materiais. Ele encarava a luz branca como uma mistura de todas as cores visíveis, a partir dos seus experimentos com o prisma.



Sua ideia estava certa?

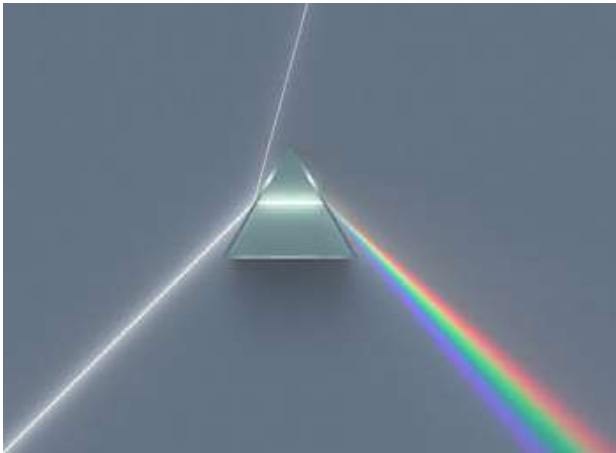


Sir Isaac Newton  
(1642-1727)



---

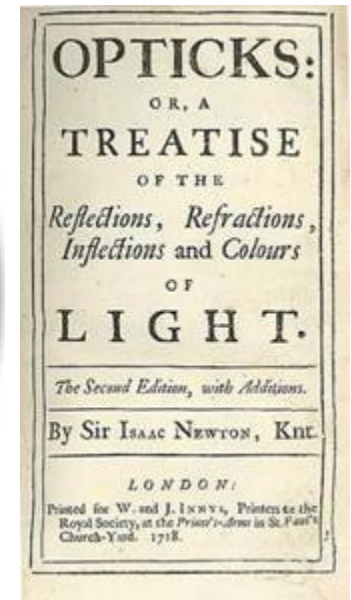
# Um pouco de história....



- Newton errou ao assumir que os corpúsculos eram formados por matéria! E conseqüentemente outras conclusões estavam erradas...



Sir Isaac Newton  
(1642-1727)



---

# Um pouco de história....

Para que estudar Ondas Eletromagnéticas???

- Vivemos na era da informação  $\Rightarrow$  transmissão de rádio, televisão, celular, etc ...

Além disso, existem estudos ainda sobre ...a interação de ondas eletromagnéticas com a matéria, controle de segurança em faixas de transmissão, equipamentos de diagnósticos e tratamentos médicos, etc, etc...

Na época de Maxwell (século XIX), as únicas ondas eletromagnéticas conhecidas eram a luz visível e os raios infravermelhos e ultravioleta;

\*A grande contribuição de Maxwell foi mostrar que o raio luminoso é uma onda eletromagnética;

---

# Um pouco de história....

- Iniciou-se a era para detectar/produzir as ondas de Maxwell;
- **Heinrich Hertz** x **Oliver Lodge** (trabalhos independentes comprovaram/produziram onda eletromagnéticas – porém, Hertz anunciou\* primeiro que havia detectado experimentalmente as ondas de Maxwell (1886));

\*anunciado no Encontro anual da Sociedade Científica Britânica;

---

# A história do eletromagnetismo

- Consequências:
  - Ondas de rádio;
  - Telégrafo “sem fio”;
  - Lodge, após a morte de Hertz, incrementou um experimento de Hertz e mostrou ao público (algo que se parecia com o telégrafo “wifi”). Apresentou uma nova forma de comunicação revolucionária (além disso ele também inventou o alto-falante, o tubo de vácuo, o sintonizador variável, entre outros.);
- **Guglielmo Marconi** viu a possibilidade de aplicar isto na comunicação marítima / transmissão de rádio. (O invento de Marconi foi baseado também em 17 patentes de N. Tesla.)



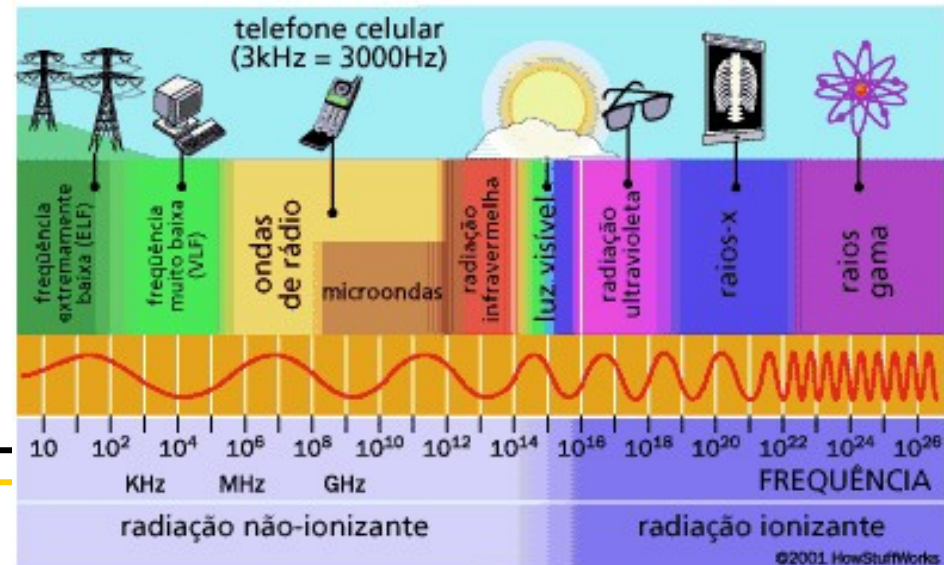
# Um pouco de história....

A grande contribuição de Maxwell foi mostrar que o raio luminoso é uma onda eletromagnética (mostrou teoricamente para somente mais tarde alguém comprovar sua teoria experimentalmente);

A diferença entre as várias ondas eletromagnéticas está no comprimento de onda e na frequência;

$$v = \lambda f$$

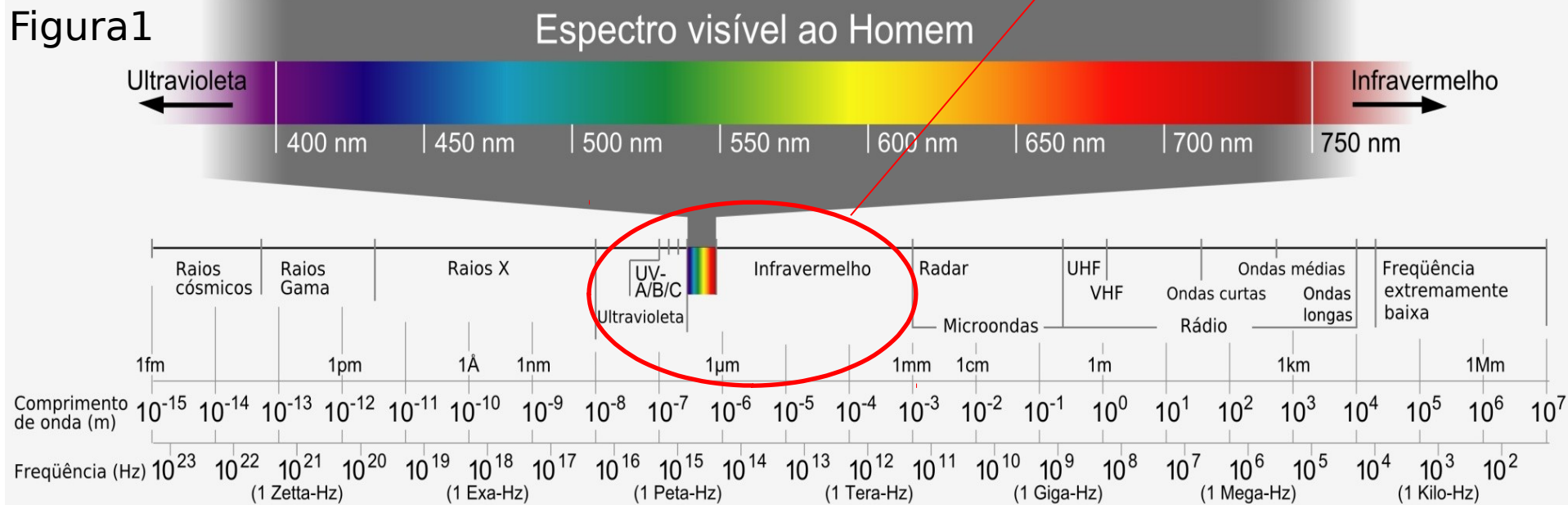
Estamos “mergulhados” num mar de ondas eletromagnéticas – sinais de rádio, TV, telefonia celular, microondas de radares, raio-X, relâmpagos, lâmpadas, etc ...



# Um pouco de história...

Faixa conhecida na época de Maxwell

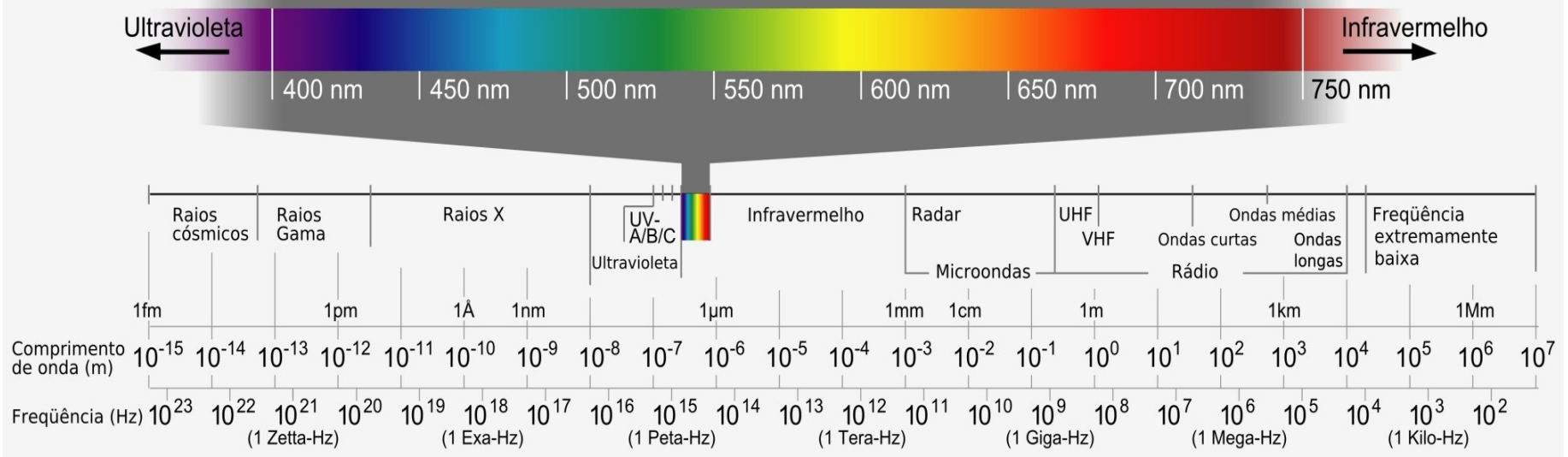
\*as extremidades da escala estão em aberto, não possui limites definidos



Região central do espectro – aproximadamente 555 nm;

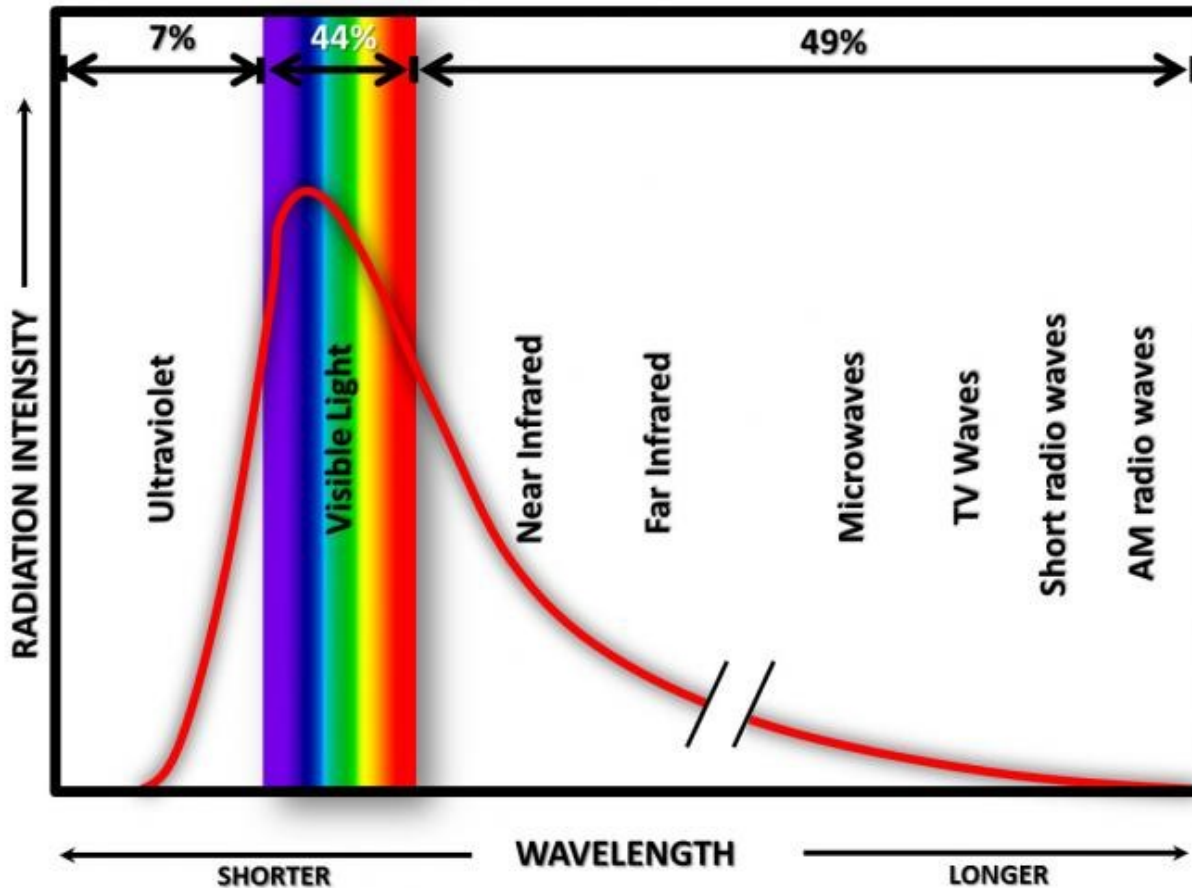
$$v = \lambda f$$

## Espectro visível ao Homem



- Todas as frequências de ondas eletromagnéticas chegam naturalmente até nós aqui na Terra? Qual apresenta maior intensidade?
- Quando você está exposto ao sol, qual faixa de frequência/comprimento de onda é responsável pelo calor que é sentido na sua pele? E qual é responsável pelos danos ou queimaduras de pele?
  - Um guarda-sol de nylon irá proteger você destas radiações?
  - Raios UV são refletidos por superfícies como areia ou neve?
  - Porque devemos usar filtro solar ou óculos de sol “confiável”?
  - Qual a diferença entre UVA, UVB e UVC?

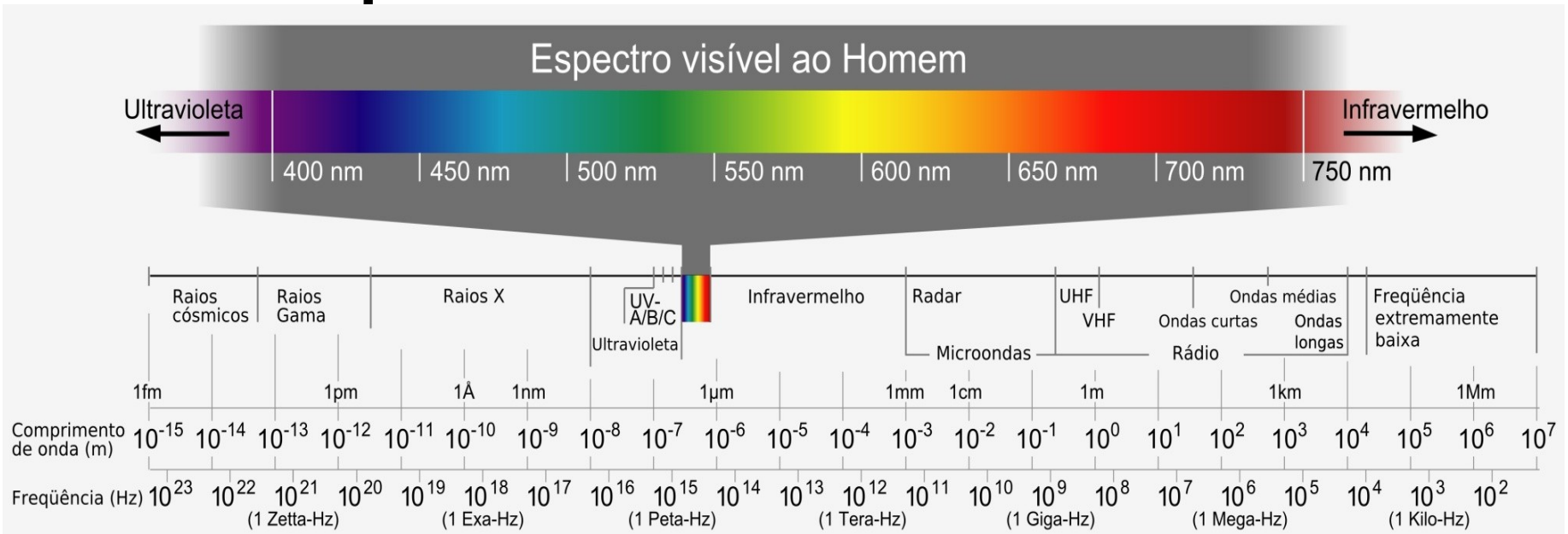
# Emissão do Sol versus Comprimento de onda



## \* *The Sun's Electromagnetic Spectrum*

*The energy that reaches the Earth is known as solar radiation. Although the sun emits radiation at all wavelengths, approximately 44% falls within visible-light wavelengths. The region of the spectrum referred to as visible light (light our eyes can detect) is composed of relatively short wavelengths in the range 400 nm through 700 nm.*

# Um pouco de história....



- Laser emite luz monocromática. Isso quer dizer que ele emite luz perfeitamente num único comprimento de onda?
- Frequências na faixa do ultravioleta (comprimentos de onda menores), possibilitam construir lasers de alta precisão em cortes cirúrgicos (cirurgia ocular);
- Raios – X – são capazes de penetrar/atravessar na pele (em tecidos mais “moles”), indispensável na medicina e odontologia, industria, etc;
- Raios gama – são muito energéticos. Usados para destruir células cancerosas.

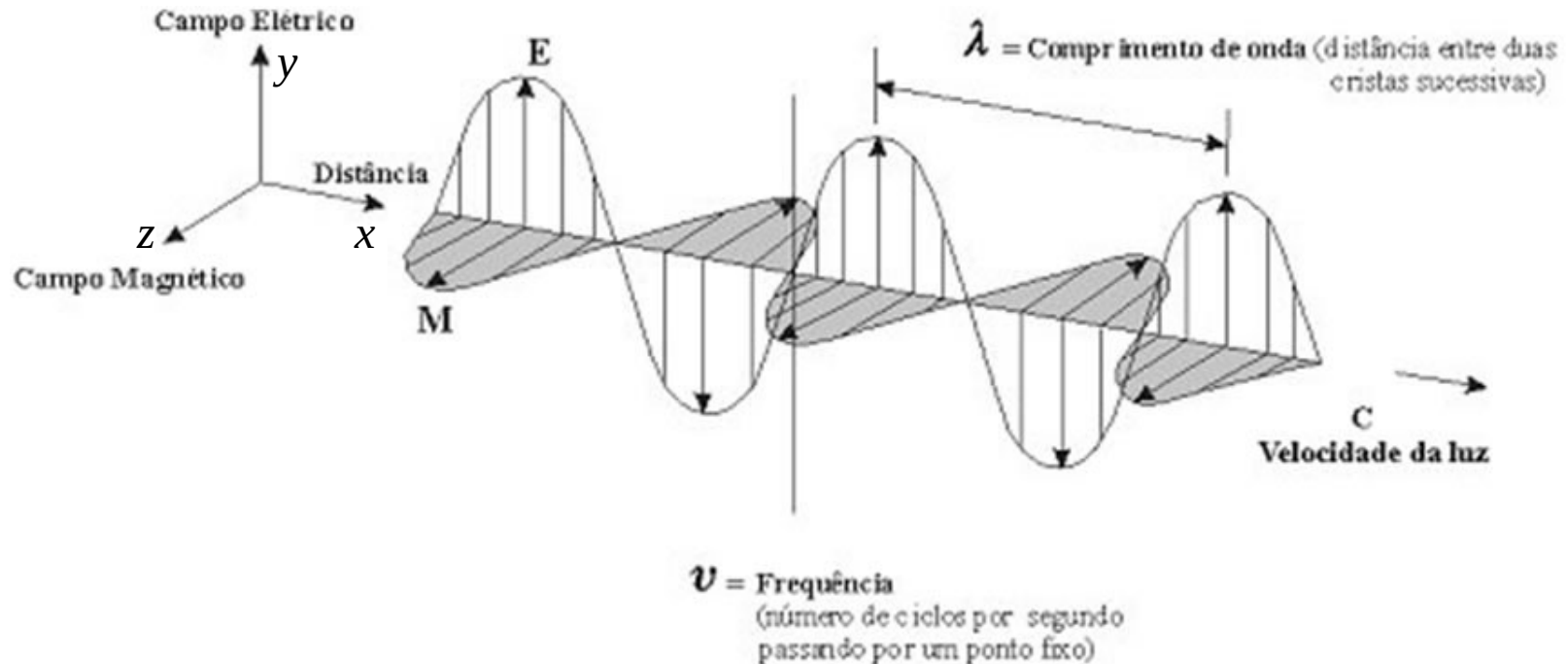
---

# Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética

## Geração de radiação eletromagnética:

- Os raios-X, raios gama e a luz visível, são produzidas por fontes de dimensões atômicas ou nucleares – explicação através da Física Quântica
- As outras ondas eletromagnéticas, por exemplo, ondas de rádio, podem ser produzidas por um oscilador  $LC$ . Este gerador/antena pode ser comparado a um dipolo elétrico cujo momento dipolar elétrico varia senoidalmente em módulo e sentido ao longo do eixo da antena.

# Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética



$$F = \nu \text{ (letra grega)} = \textit{frequência}$$

Representação de uma onda eletromagnética



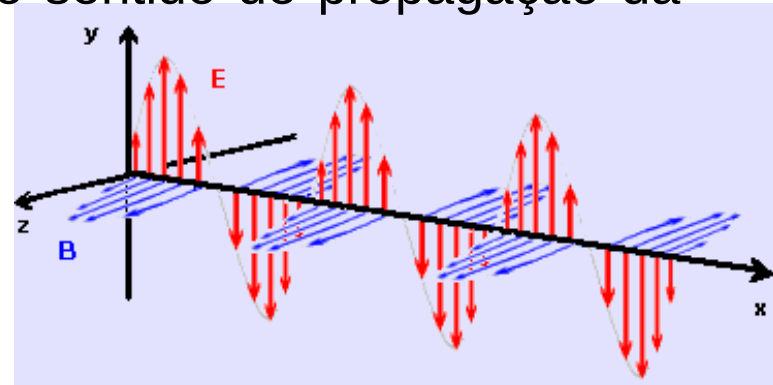
---

# Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética

Propriedades importantes de Ondas eletromagnéticas que analisaremos:

Independente da forma como ela foi criada:

- i) O campo elétrico é PERPENDICULAR ao campo magnético;
- ii) Os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  são PERPENDICULARES à direção de propagação (onda transversal – direção de vibração é perpendicular à direção de propagação);
- iii) O produto vetorial  $\vec{E} \times \vec{B}$  aponta no sentido de propagação da onda;
- iv) Os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  variam senoidalmente com a mesma frequência e estão EM FASE;





---

# Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética

Lembrando que:

Ondas eletromagnéticas não precisam de um meio material para se propagar;

Veremos adiante que as duas componentes (campo elétrico e magnético) não podem existir separadamente (quando os campos variam com o tempo. Neste momento considere todas as nossas análises sempre no ar ou vácuo).

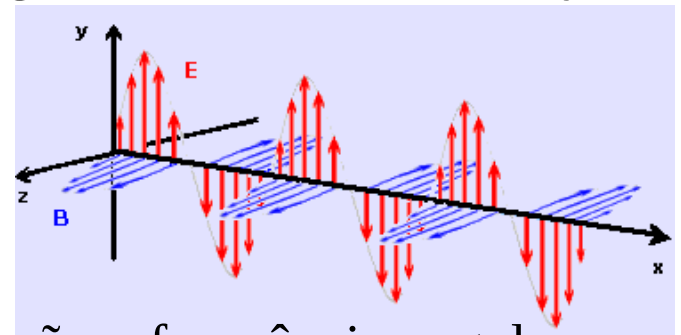
Podemos descrever os campos elétricos e magnéticos através de funções senoidais da posição  $x$  e do tempo  $t$ :

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

onde  $E_m$  e  $B_m$  é a amplitude de oscilação,  $\omega$  e  $k$  são a frequência angular e o número de onda.

---



---

# Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética

Através das equações do campo elétrico e magnético e da equação de Ampère-Maxwell, veremos a frente que:

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$\mu_0$  = permeabilidade magnética do vácuo;

$\epsilon_0$  = permissividade elétrica do vácuo;

que é aproximadamente  $3,0 \times 10^8$  m/s.

Todas as ondas eletromagnéticas, incluindo a luz visível, se propagam no vácuo com a mesma velocidade  $c$ .

---

# Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética

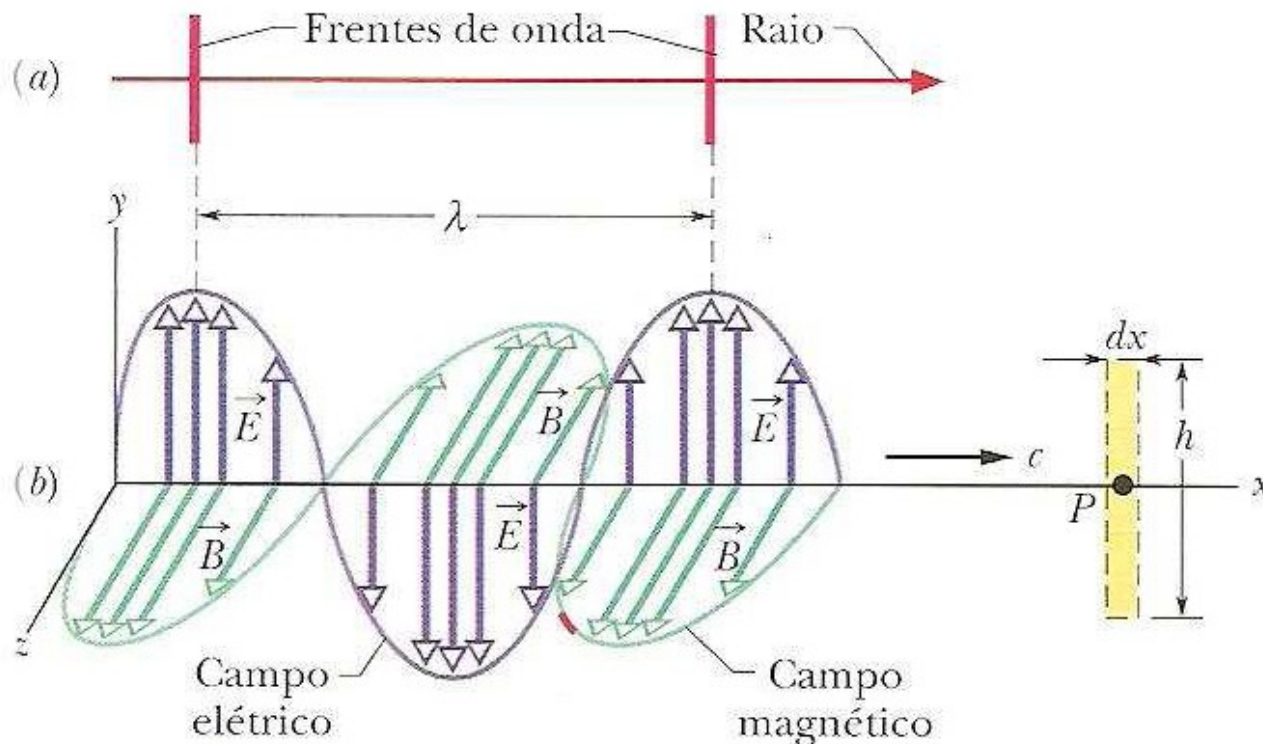
Veremos também, através das equações do campo elétrico e magnético e das equação de Faraday, que a velocidade da luz pode ser dada por:

$$c = \frac{E}{B}$$

Mais a frente iremos provar essa relação!

# Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética

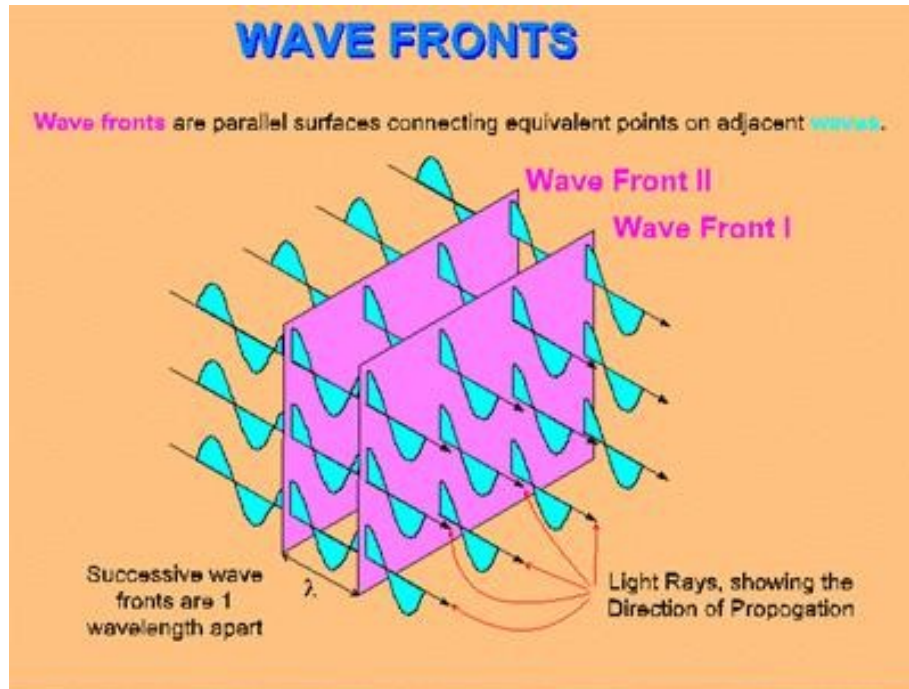
- ❖ Podemos representar uma onda eletromagnética por **um raio** (uma reta orientada que mostra a direção de propagação da onda) ou por **frentes de onda** (superfície imaginárias nas quais o campo elétrico tem o mesmo módulo);



---

# Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética

- ❖ Representação de **frentes de onda** (superfície imaginárias nas quais o campo elétrico tem o mesmo módulo);
- ❖ Outro ponto de vista de Frentes de onda (em rosa);



\*Vamos trabalhar com **frentes de ondas planas**;  
Se for uma frente de onda esférica, considerar uma pequena região da frente de onda distante da fonte (isso é uma boa aproximação para uma frente de onda plana).

---

---

# Descrição matemática de uma onda eletromagnética

---

# Descrição matemática de uma onda eletromagnética

...lápiz e papel...

# Descrição matemática de uma onda eletromagnética

PRIMEIRA ANÁLISE: vamos comprovar que:

$$c = \frac{E}{B}$$

Lembre-se que:

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

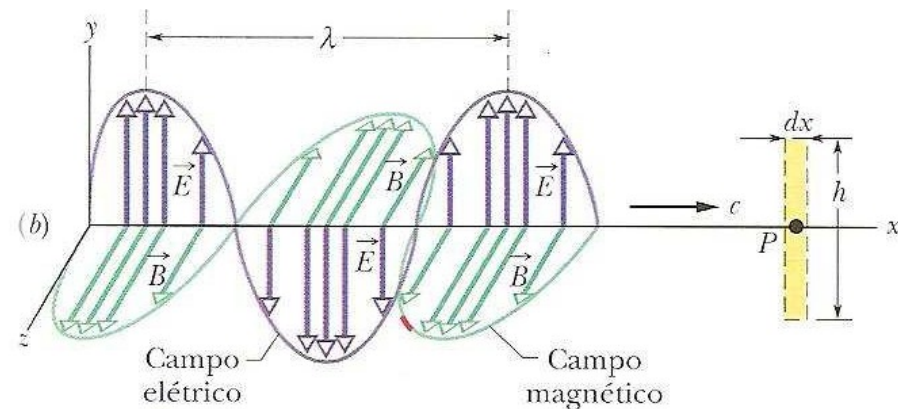
$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

e que a frequência e a fase dos dois campos são iguais!

✓ Para isso partimos da *Lei de Indução de Faraday*

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Supor: Integral no sentido anti-horário  $\Rightarrow$





# Descrição matemática de uma onda eletromagnética

Primeiramente, vamos comprovar que:

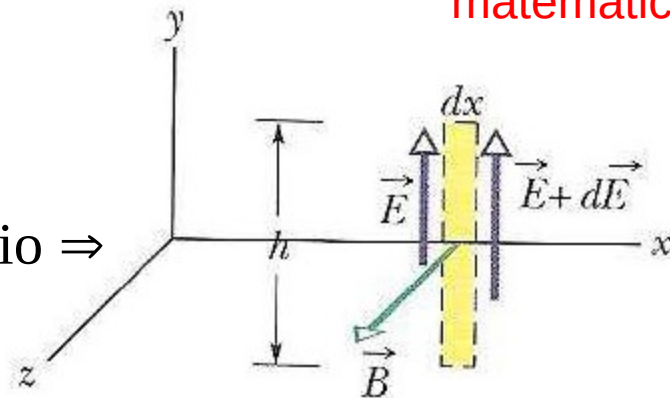
$$c = \frac{E}{B}$$

Se imaginarmos o perímetro do retângulo como uma espira, surgiria uma corrente elétrica no sentido anti-horário

✓ Para isso partimos da *Lei de Indução de Faraday*

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Integral de caminho  
no sentido anti-horário  $\Rightarrow$



Descrição matemática...



---

# Descrição matemática de uma onda eletromagnética

SEGUNDA ANÁLISE: Vamos agora provar que:

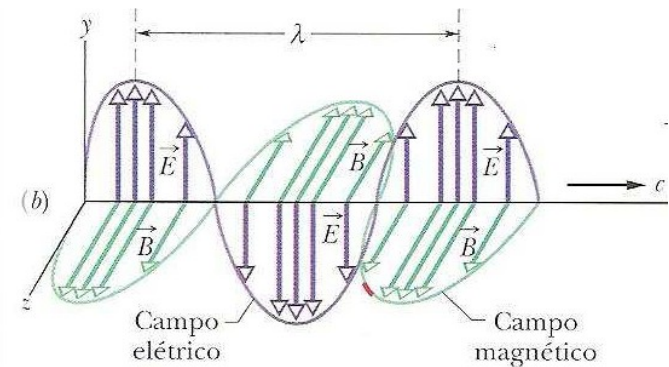


Onde  $\omega$  e  $k$  são a frequência angular e o número de onda!

✓ Partimos da *Lei de Indução de Maxwell*

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Integral de caminho no sentido anti-horário  $\Rightarrow$



# Descrição matemática de uma onda eletromagnética

Lembre-se que:

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

E que a frequência e a fase dos dois campos são iguais!

Vamos agora provar que:

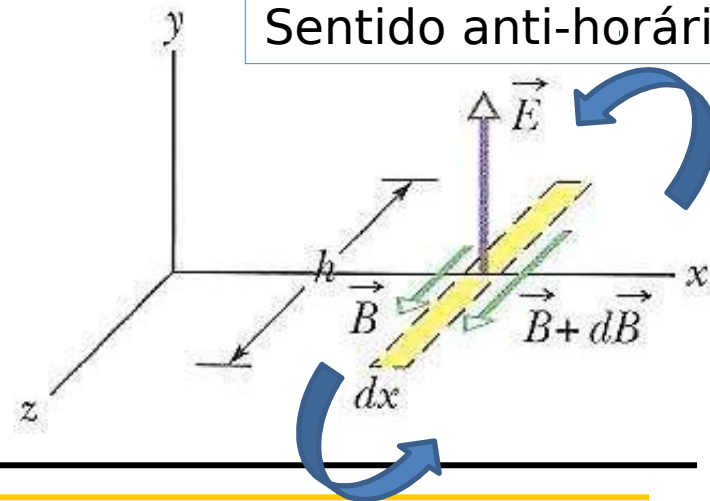
$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Onde  $\omega$  e  $k$  são a frequência angular e o número de onda!

✓ Partimos da **Lei de Indução de Maxwell**

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Mantém-se a integral de caminho no sentido anti-horário  $\Rightarrow$



Integração de caminho  
Sentido anti-horário

---

# Exemplo

## Exemplo resolvido 32.1 (livro: Sears)

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 é igual a  $10,6 \times 10^{-6}$  m, o campo elétrico é paralelo ao eixo  $Oz$  e seu módulo máximo é igual a 1,5 MV/m. Escreva as equações vetoriais para  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  em função do tempo e posição.

Lembrando que a direção de propagação é dada por:

$$\vec{E} \times \vec{B}$$

---

# Referências

Figuras retiradas de:

<http://www.sbfisica.org.br/v1/pion/index.php/publicacoes/imagens/130-espectro-eletromagnetico;>

<http://fisica.ufpr.br/viana/fisicab/aulas2/aula29.html>

<http://einsteinjournal.blogspot.com.br/2011/02/ondas-eletromagneticas-microondas.html>

[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_05\\_06/io4/public\\_html/focalizacion.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io4/public_html/focalizacion.htm)

- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009 vol 3 e 4;