

Física Experimental IV

Ondas Eletromagnéticas

Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva

SUMÁRIO

- Introdução às ondas eletromagnéticas
- Equações de Maxwell e ondas eletromagnéticas
- Espectro de ondas eletromagnéticas
- Ondas eletromagnéticas planas e a velocidade da luz
- Energia de uma onda eletromagnética
- Momento e pressão de radiação
- Referências

Introdução

O que é luz?

A unificação da teoria da eletricidade e do magnetismo, conhecida como eletromagnetismo.

Equações de Maxwell.

Essas equações mostram que um campo magnético variável funciona como fonte de campo elétrico e que um campo elétrico variável funciona como uma fonte de campo magnético.

Esses campos \vec{E} e \vec{M} podem se sustentar mutuamente, formando uma **onda eletromagnética** que se propaga no espaço.

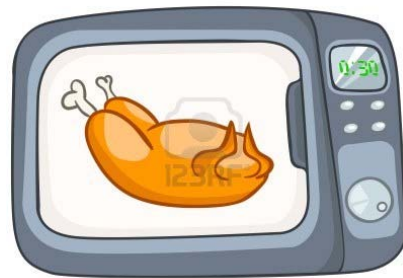
Exemplos de fontes emissoras de ondas eletromagnéticas



Luz visível emitida por um filamento de lâmpada incandescente



Emissoras de rádio e TV



Osciladores de micro-ondas



Aparelhos de raios X

- Diferem entre si, apenas pela frequência e pelo comprimento de onda.

Diferentemente das ondas em uma corda ou do som se propagando em um fluido, **as ondas eletromagnéticas não precisam de um meio para se propagar.**



A luz das estrelas que enxergamos em uma noite clara, viajou sem nenhuma dificuldade por dezenas de anos-luz através do espaço vazio.

Equações de Maxwell e ondas eletromagnéticas

Equações de Maxwell

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (\text{Lei de Gauss})$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss para o magnetismo})$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (\text{Lei de Faraday})$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (\text{Lei de Ampère})$$

As duas últimas equações mostram que variações espaciais ou temporais do campo elétrico (magnético) provocam variações espaciais ou temporais do campo magnético (elétrico).

- Uma carga puntiforme em repouso produz um campo elétrico estático, mas não gera campo magnético.
- Uma carga puntiforme que se move com uma velocidade constante produz tanto campo elétrico como campo magnético.

Para produzir ondas eletromagnéticas é necessário que a carga esteja acelerada.



Todo telefone celular, modem sem fio ou transmissor de rádio emite sinais na forma de ondas eletromagnéticas



Linhas de transmissão de energia elétrica transportam uma forte corrente alternada, gerando ondas eletromagnéticas

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

Penetrates Earth Atmosphere?



Wavelength (meters)



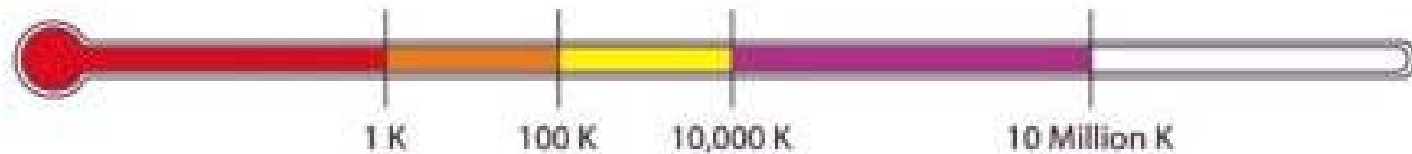
About the size of...



Frequency (Hz)



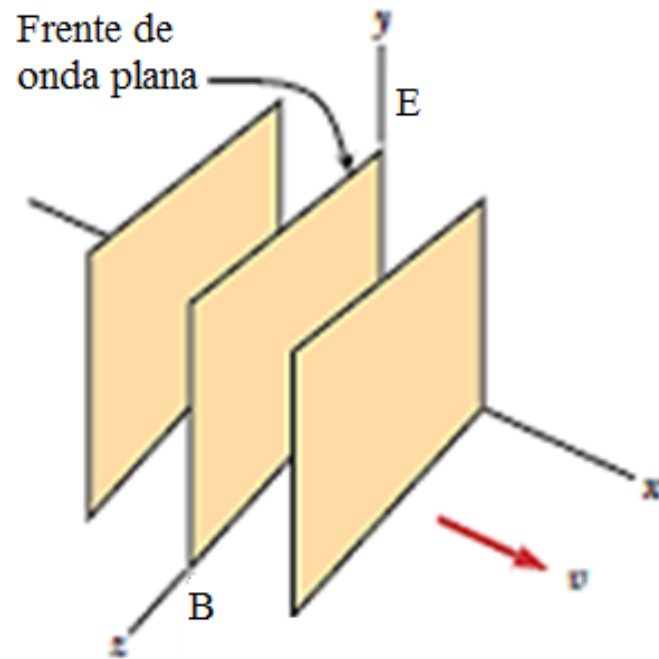
Temperature of bodies emitting the wavelength (K)



Ondas eletromagnéticas planas e a velocidade da luz

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (\text{Lei de Faraday})$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (\text{Lei de Ampère})$$



Com essas expressões, e com a hipótese de a onda ser plana, chega-se às seguintes equações:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Derivando em relação a x :

$$\Rightarrow \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \vec{B}}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left[-\mu_0 \epsilon_0 \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \right]$$

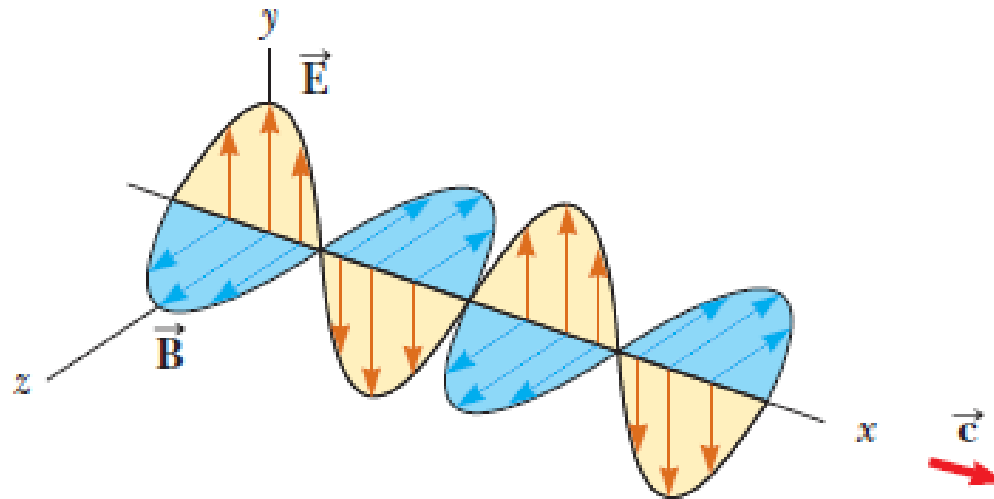
$$\boxed{\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \longrightarrow \quad E = E_m \cos(kx - \omega t) \\ \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad \longrightarrow \quad B = B_m \cos(kx - \omega t) \end{array} \right.$$

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

Com isso, encontra-se o valor de c :

$$c = 2,99792 \times 10^8 \text{ m/s}$$



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

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

onde, E_m e B_m são os valores máximos dos campos.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \longrightarrow \text{número de onda}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \longrightarrow \text{frequência angular}$$

$$\frac{\omega}{k} = \lambda f = c \longrightarrow \text{velocidade da luz}$$

$$\lambda \longrightarrow \text{comprimento de onda}$$

$$f \longrightarrow \text{frequência}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E = E_m \cos(kx - \omega t) \\ B = B_m \cos(kx - \omega t) \end{array} \right.$$

Lembrando que:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Tomando as derivadas parciais, temos:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -kE_m \sin(kx - \omega t)$$

$$kE_m = \omega B_m$$

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_m \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{\omega}{k} = c$$

Ou seja, em qualquer instante, a razão entre o campo elétrico e o campo magnético de uma onda eletromagnética é igual à velocidade da luz.

Resumo das propriedades das ondas eletromagnéticas:

- 1) As soluções da terceira e da quarta equações de Maxwell são ondulatórias, e os campos E e B obedecem à mesma equação de onda.
- 2) As ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com a velocidade da luz, c .
- 3) O campo elétrico e o campo magnético, componentes das ondas planas eletromagnéticas, são perpendiculares um ao outro e também perpendiculares à direção de propagação da onda. Essa última propriedade pode ser resumida na afirmação de as eletromagnéticas serem ondas transversais.
- 4) Os módulos de E e B , no vácuo, estão relacionados por $E/B = c$.
- 5) As ondas eletromagnéticas obedecem ao princípio da superposição.

Energia de uma onda eletromagnética

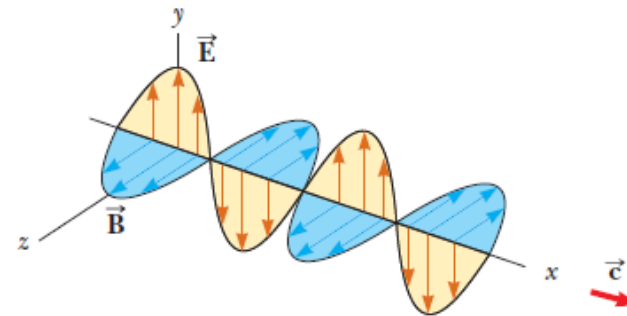
As ondas eletromagnéticas são portadoras de energia e, ao se propagarem no espaço, podem transferir energia para os corpos que se encontram na trajetória percorrida.

A taxa de fluxo de energia, numa onda eletromagnética, é descrita por um vetor S , denominado o **vetor de Poynting**, que se define por:

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

O módulo do vetor de Poynting representa a taxa em qual a energia passa por uma superfície de área unitária perpendicular à direção de propagação.

Potência por unidade de área.



Para uma onda eletromagnética plana temos:

$$S = \frac{EB}{\mu_0} \longrightarrow S = \frac{E^2}{\mu_0 c} = \frac{cB^2}{\mu_0}$$

Lembrando que:

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

Essas equações se aplicam em qualquer instante de tempo.

A média de S sobre o tempo, tomada em um ou mais de um ciclo é chamada de **intensidade da onda**, I .

$$I = S_{\text{méd}} = \frac{E_m B_m}{2\mu_0} = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c} = \frac{cB_m^2}{2\mu_0}$$

Exemplo:

Energia solar

O Sol proporciona cerca de 1000 W/m^2 de fluxo eletromagnético à superfície da Terra. Calcular a potência incidente num telhado de $8 \text{ m} \times 20 \text{ m}$.

$$\text{Potência} = S \cdot A$$

$$\text{Potência} = (1.000 \text{ W/m}^2) \cdot (8 \times 20 \text{ m}^2)$$

$$\text{Potência} = 1,60 \times 10^5 \text{ W}$$

Momento e pressão de radiação

As ondas eletromagnéticas são portadoras de momento linear, assim como de energia. Então, quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície, exerce uma pressão (pressão de radiação) sobre a superfície.

Absorção completa:

$$\text{momento linear: } p = \frac{U}{c} \quad \text{pressão de radiação: } P_{rad} = \frac{S_{méd}}{c} = \frac{I}{c}$$

Reflexão completa:

$$\text{momento linear: } p = \frac{2U}{c} \quad \text{pressão de radiação: } P_{rad} = \frac{2S_{méd}}{c} = \frac{2I}{c}$$

Exemplo:

Energia solar

O Sol proporciona cerca de 1000 W/m^2 de fluxo eletromagnético à superfície da Terra. Calcular a pressão de radiação e a força de radiação sobre o telhado, admitindo que o telhado seja um absorvedor perfeito. Área de $8 \text{ m} \times 20 \text{ m}$.

Pressão de radiação:

$$P = \frac{S}{c} = \frac{1.000 \text{ W/m}^2}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3,33 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$$

Força de radiação:

$$F = P.A = (3,33 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2).(160 \text{ m}^2)$$
$$F = 5,33 \times 10^{-4} \text{ N}$$

Referências:

Sears e Zemansky; Física III, 12^a Edição, editora Pearson, 2012.

Serway; Física 3, 3^a Edição, editora LTC, 1992.