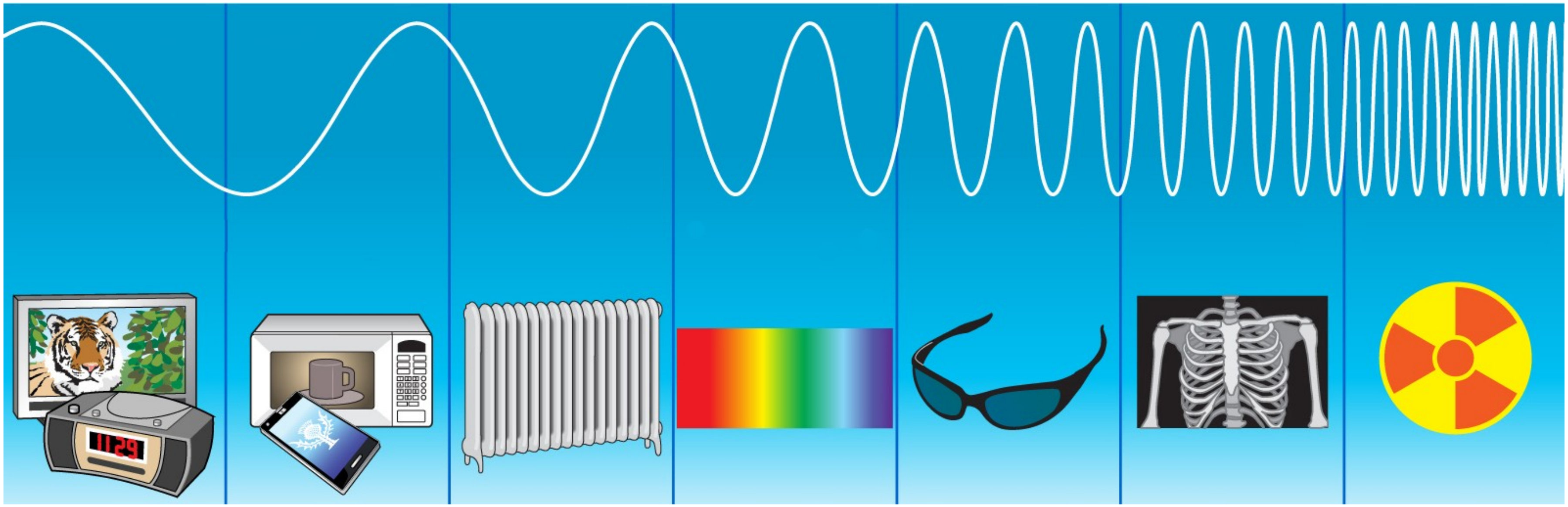
Ondas Eletromagnéticas

Roberto Ortiz

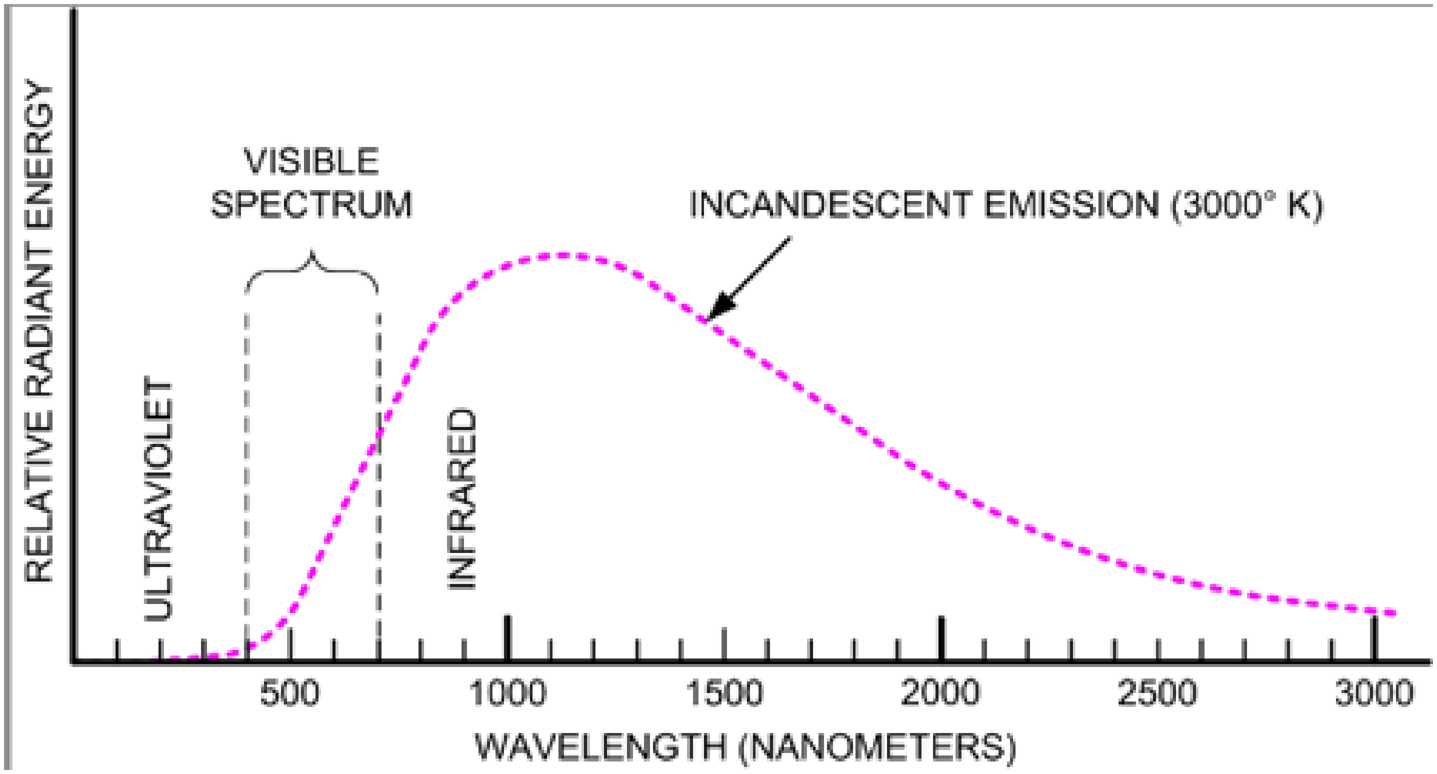
Professor Livre-Docente
EACH – USP

O espectro eletromagnético



- Ondas eletromagnéticas assumem diferentes características, dependendo do seu comprimento de onda
- À decomposição da energia (ou potência) irradiada nos diversos comprimentos de onda chamamos espectro.
- As diferentes partes do espectro são, grosseiramente: ondas de rádio (ondas curtas, AM, FM, TV), infravermelho (distante, médio, próximo), luz visível, UV (próximo, distante), raios-X, raios-γ.

<u>Abaixo</u>: o espectro de uma lâmpada incandescente. A maior parte da potência é irradiada no infravermelho e não é detectada pelo olho humano.

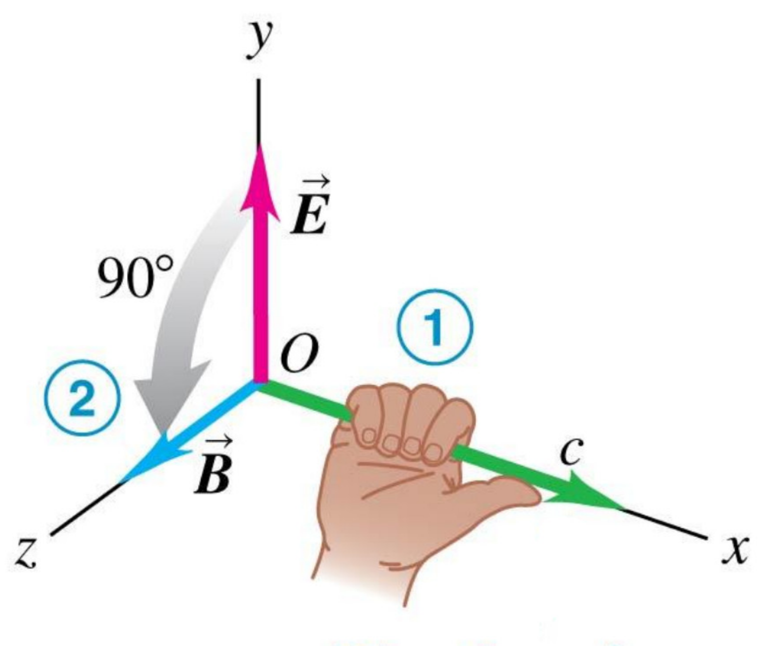


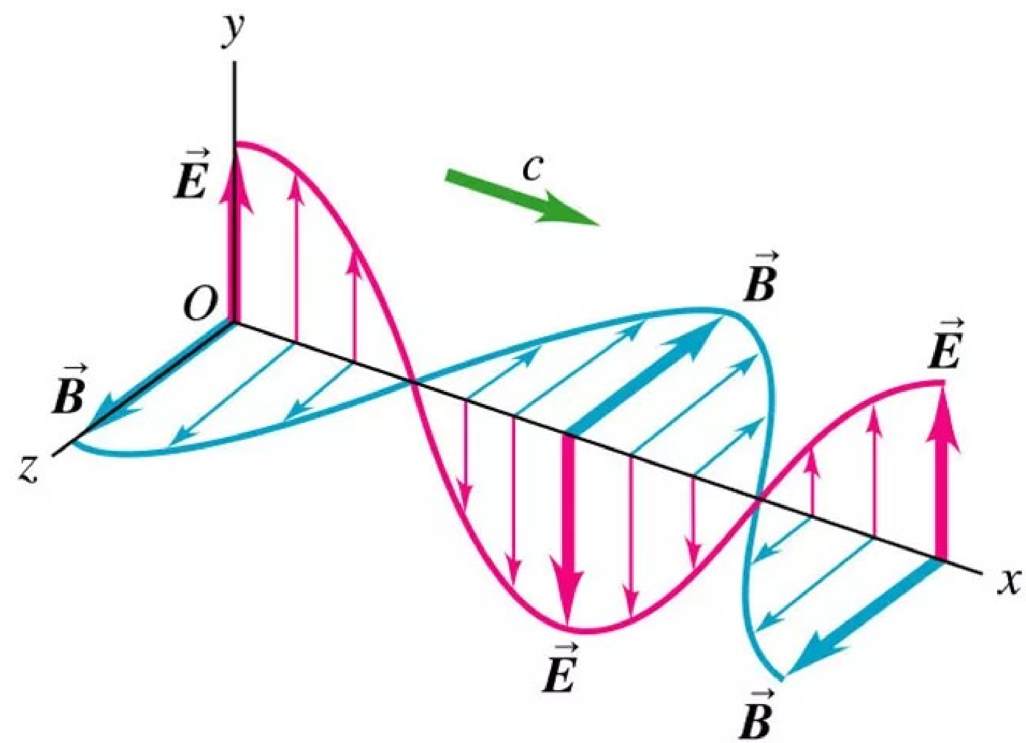
Semelhanças e diferenças entre os diversos tipos de ondas eletromagnéticas:

- Todas são ondas eletromagnéticas (campos, elétrico e magnético transversais, oscilantes)
- Todas se propagam com a mesma velocidade no vácuo, a “velocidade da luz” c = 2 997 924 km/s
- As ondas de menor frequência (maior comprimento de onda) requerem menor energia para serem produzidas (e vice-versa)
- A interação dessas ondas com a matéria varia conforme o comprimento de onda.

Características das ondas eletromagnéticas

- São ondas <u>transversais</u>.
- Há duas componentes: o campo <u>elétrico</u> e o campo <u>magnético</u>
- Ambas as componentes <u>oscilam temporalmente em fase</u>.
- A <u>direção de propagação</u> é dada pelo produto vetorial entre o campo elétrico e magnético (nesta ordem) ou a “regra da mão-direita”





Como são geradas as ondas eletromagnéticas?

- Depende da frequência (ou do comprimento de onda)
  - ondas de rádio podem ser geradas por meio de correntes variáveis em bobinas ou mesmo em fios simples.
  - As lei de Faraday (a ver na disciplina *Eletromagnetismo*) mostra como surgem campos eletro-magnéticos induzidos por correntes variáveis
  - Esses campos são variáveis e se propagam à velocidade da luz

Acima: uma bobina.

Como são geradas as ondas eletromagnéticas?

- Ondas infravermelhas são geradas pela agitação térmica dos átomos e/ou moléculas de um corpo (sólido, líquido ou gasoso)
- Quanto maior a temperatura do corpo, maior a intensidade das ondas eletromagnéticas de maior frequência (< λ), e vice-versa.
- A agitação dos átomos e/ou moléculas é, de certa maneira, uma medida da temperatura do corpo

Acima: um aquecedor a óleo.

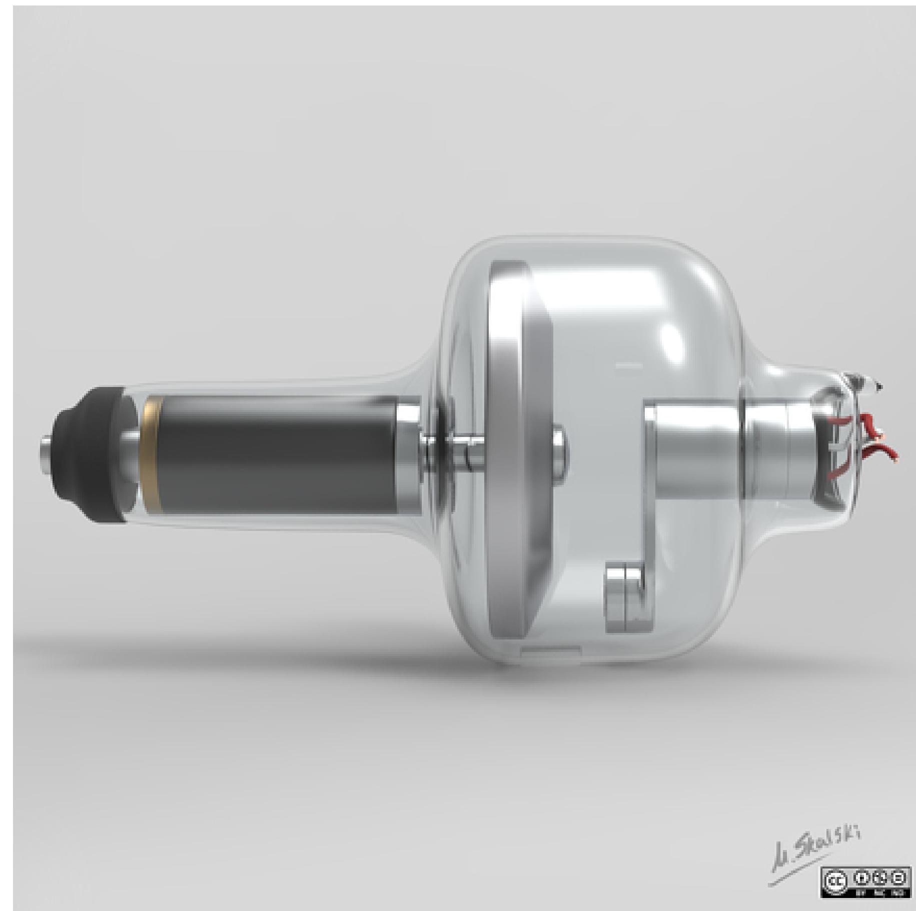
Como são geradas as ondas eletromagnéticas?

- A luz visível pode ser gerada por diversos mecanismos
- A Mecânica Quântica explica esses processos (a ver na disciplina *Estrutura da Matéria*)
- Exemplo: ao se fazer passar uma corrente elétrica por um fio metálico este se aquece e emite radiação infravermelha e luz visível: a lâmpada incandescente.

Acima: uma lâmpada incandescente.

Como são geradas as ondas eletromagnéticas?

- Radiação UV, X e γ são geradas por processos energéticos envolvendo átomos (UV), elétrons (raios-X) ou seus núcleos (raios-γ).
- Esses processos são explicados pela Mecânica Quântica (a ver na disciplina *Estrutura da Matéria*)



Acima: um tubo gerador de raios-X.

Equações das ondas eletromagnéticas

- Conforme já foi comentado, a radiação pode ser gerada por campos elétrico ou magnético variáveis. A formação de um campo eletromagnético variável deverá ser abordada na disciplina *Eletromagnetismo*.
- Vamos nos limitar a discutir aqui as <u>características</u> das ondas eletromagnéticas.
- Para simplificar, vamos supor que o meio de formação e propagação dessas ondas seja o <u>vácuo</u>.
- Esses resultados são <u>bastante adequados</u> para a descrição de ondas eletromagnéticas no ar, mas não em outros meios como vidro, água, etc.

- Quando os campos elétrico e magnético variam harmonicamente, a onda transversal pode ser representada pelas seguintes equações:

$$E(x,t) = E_m \sin(k\,x - \omega\, t)$$

e

$$B(x,t) = B_m \sin(k\,x - \omega\, t)$$

- onde a direção de propagação da onda é x e E_m e B_m são as <u>amplitudes</u> dos campos elétrico e magnético oscilantes. As direções de x, $E(x,t)$ e $B(x,t)$ são perpendiculares entre si.
- No vácuo, temos que:

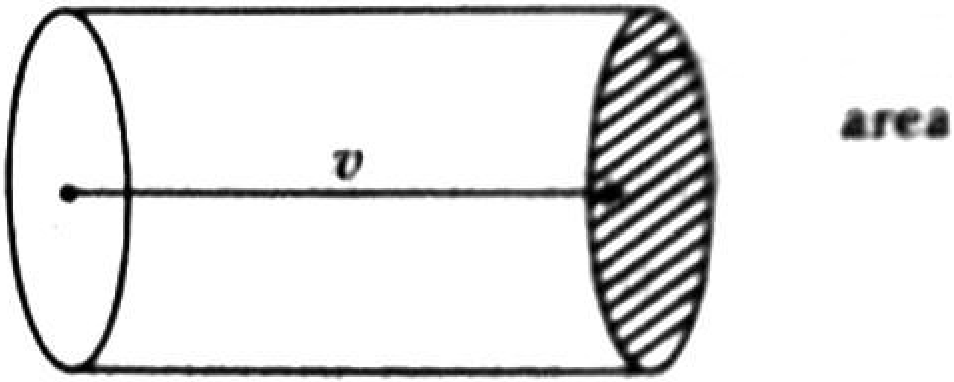
$$\frac{E_{\mathrm{m}}}{B_{\mathrm{m}}} = c$$

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

- onde c é a velocidade da luz no vácuo, μ_0 é *constante de permeabilidade* no vácuo ($\mu_0 = 4\,\pi \times 10^{-7}$ H/m) e ε_0 é a *constante de permissividade* no vácuo ($8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m).

Intensidade de uma onda eletromagnética

- Conforme já foi visto, a intensidade de uma onda é definida como a potência transmitida em uma direção por unidade de área (cuja normal é perpendicular à direção de propagação)



Intensidade de uma onda eletromagnética

- A intensidade pode ser calculada a partir do vetor de Poynting. Ele nos dá a direção e a intensidade instantânea da onda eletromagnética:

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

$$S(t) = \frac{1}{\mu_0}E(t)B(t)$$

pois os vetores campo elétrico e magnético são perpendiculares entre si. Note que, como esses campos são variáveis, o vetor de Poynting fornece a intensidade em um instante *t* dado (em W/m^2).

- A frequência das ondas eletromagnéticas é quase sempre muito elevada, por isso a intensidade da onda (*I*) representa um valor médio do vetor de Poynting.
- Inicialmente substituimos o valor de ***B*** por ***E/c***. Em seguida, calcularemos a média temporal da função:

$$E_m \sin (k\, x - \omega\, t)$$

que já foi anteriormente dada, sobre um período de oscilação:

$$S(t) = \frac{1}{\mu_0} E(t) \frac{E(t)}{c}$$

$$S(t) = \frac{1}{\mu_0 c} E^2(t)$$

$$I = \overline{S} = \frac{1}{\mu_0 c} \overline{E^2} = \frac{1}{\mu_0 c} \overline{E_\mathrm{m} \sin^2(kx - \omega t)}$$

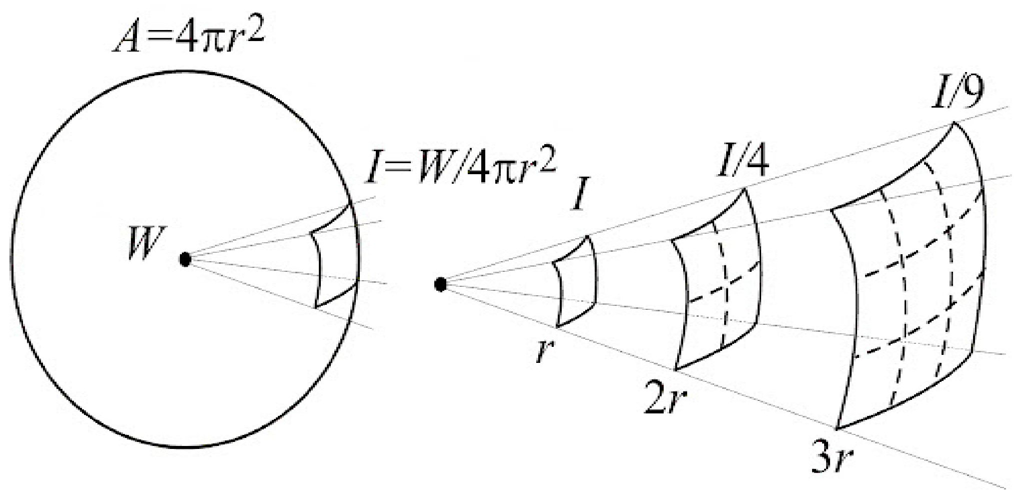
$$I = \frac{1}{2\mu_0 c} E_\mathrm{m}^2$$

pois o valor médio de $\sin^2(x)$ sobre um período de 2π é igual a ½ e E_m é a amplitude do campo elétrico. A relação acima estabelece uma relação entre a intensidade da radiação *I* e o valor do campo elétrico *E*.

Exemplo: suponha que uma antena irradie ondas eletromagnéticas isotropicamente (i.e. com a mesma intensidade em todas as direções) com uma potência de 60 W. Estime a intensidade do campo elétrico à distância de 1 metro da antena. Compare o seu resultado com o do campo elétrico de um capacitor de placas paralelas com uma d.d.p. de 12 V e separação entre as placas de 2 mm.

Sol.: a potência da antena é suposta estar distribuída em uma superfície (imaginária) de raio igual a 1 m. Logo, se *W* for a potência, a intensidade *I* da radiação a essa distância é:

$$I = W / 4\pi r^2$$



Utilizamos as relações que já obtivemos e isolamos E_m:

$$E_{\mathrm{m}}^2 = 2\mu_0 c I = \frac{2\mu_0 c W}{4\pi r^2}$$

onde W é a potência da antena e r é a distância (considerada igual a 1 metro). Substituindo os valores, obtemos:

$$E^2_m = (2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 3 \times 10^8 \times 60) / 4\pi\ 1^2$$

$$E_m = 60\ \mathrm{V/m}$$

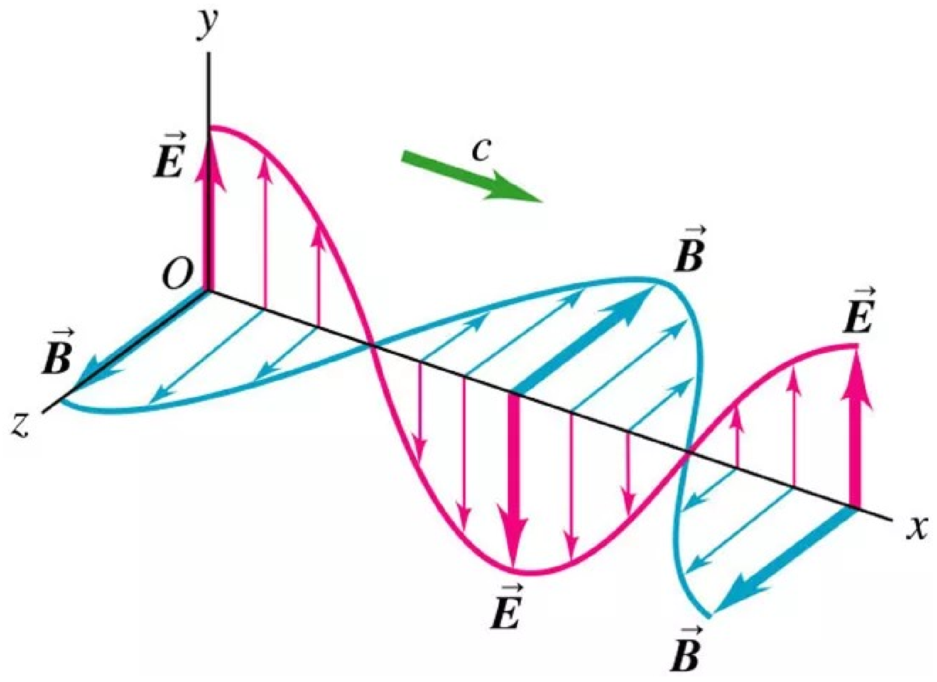
No caso de um capacitor, teríamos:

$$\Delta V = -E\ .\ \Delta x \rightarrow |E| = 12\ \text{volts} / 2 \times 10^{-3}\ \text{m} = 6\,000\ \text{V/m}$$

(i.e. o campo elétrico do capacitor seria 100 vezes mais intenso que o da antena)

Polarização da onda eletromagnética

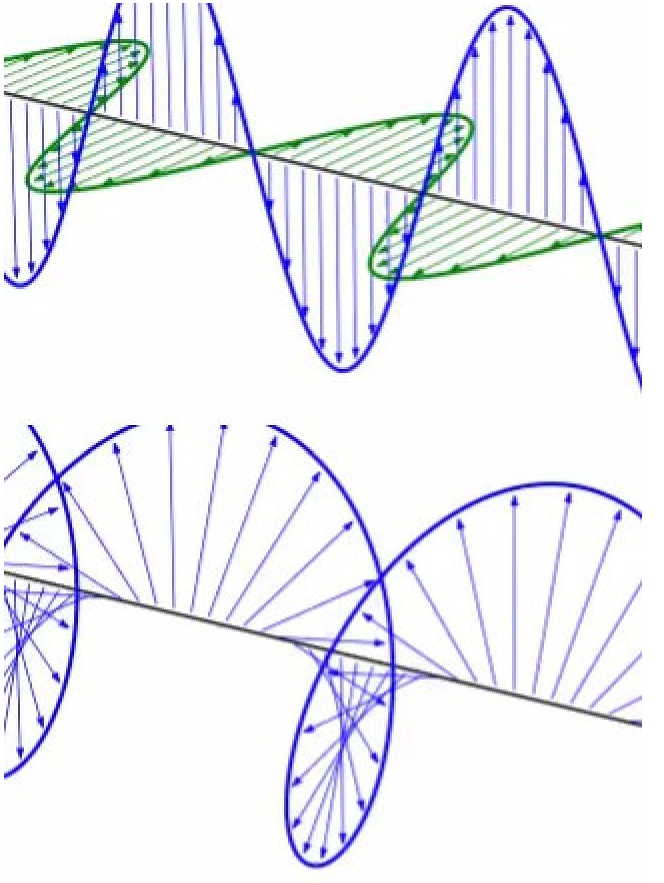
- Na ilustração ao lado, o campo elétrico oscila somente em uma direção (neste caso, vertical)
- Este é um caso de onda linearmente polarizada.
- Em geral, os vetores campo elétrico e magnético podem oscilar em qualquer direção do plano yz.
- Ondas podem se tornar linearmente polarizadas de diversas maneiras: uso de filtros polarizadores, por reflexão, etc.



Polarização circular

- Se uma onda de rádio é polarizada linearmente na direção horizontal (vertical) pela antena emissora, então a melhor recepção se dará com a antena receptora na mesma posição horizontal (vertical).

- Para contornar essa limitação, algumas emissoras emitem seu sinal com polarização circular.
- Nela, o vetor campo elétrico (e magnético) executam uma rotação à medida que se propagam.
- Deste modo, não importa o ângulo que a antena esteja, (quase) sempre haverá uma componente do campo elétrico paralela às varetas da antena.
- A polarização circular é feita utilizando-se duas antenas (uma vertical e outra horizontal), com uma diferença de fase de $\pi/2$ ou $3\pi/2$ entre elas (veja a aula sobre oscilações em 2 dimensões).



Refração de ondas eletromagnéticas

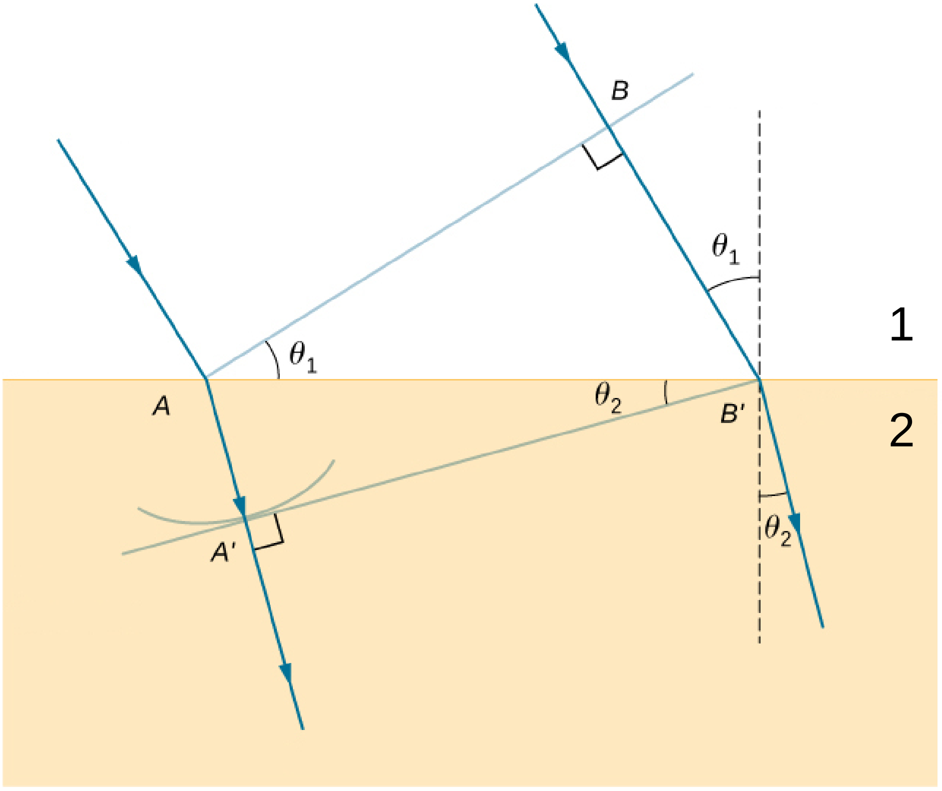
- Vimos anteriormente que ondas podem sofrer um desvio à medida que a velocidade de propagação se altera.
- O desvio ocorre quando a direção de propagação não é paralela à normal à interface onde ocorre a mudança de velocidade.
- A luz (e demais ondas eletromagnéticas) está sujeita à refração.

Cálculo geométrico da refração

$$\sin\theta_1 = \frac{BB'}{AB'} = \frac{v_1 t}{AB'}$$

$$\sin\theta_2 = \frac{AA'}{AB'} = \frac{v_2 t}{AB'}$$

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



- No caso de ondas eletromagnéticas denominamos índice de refração *n* de um meio onde se propaga a radiação à razão:

$$n = c \,/\, v$$

onde *c* é a velocidade da luz no vácuo e *v* é a velocidade da luz no meio em questão. Deste modo, a relação que obtivemos para o desvio da onda pode ser escrita em termos do índice de refração *n*:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}$$

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

A relação acima é conhecida como Lei de Snell da óptica física. Obviamente, o índice de refração do vácuo é igual a 1.

Exemplo: um raio de luz incide sobre uma lâmina de água. O ângulo de incidência feito com à normal à superfície é de 45º. Ao penetrar na água, o feixe de luz faz um ângulo de 30º com a normal à superfície. Calcule:

(a) o índice de refração da água
(b) a velocidade de propagação da luz na água.

Sol.: **(a)** utilizamos a lei de Snell para calcular n_{agua}:

$$\frac{\sin\theta_{\mathrm{inc}}}{\sin\theta_{\mathrm{refr}}} = \frac{n_{\mathrm{agua}}}{n_{\mathrm{ar}}} = \frac{n_{\mathrm{agua}}}{1}$$

$$n_{\mathrm{agua}} = \frac{(\sqrt{2}/2)}{1/2} = \sqrt{2} \simeq 1.41$$

(b) Cálculo da velocidade da luz na água:

$$n_{agua} = c / v_{agua} \rightarrow v_{agua} = c / n_{agua}$$

$$v_{agua} = (299 \text{ x } 10^3 \text{ km/s}) / 1.41$$

$$v_{agua} = 212 \text{ mil km/s}$$

O efeito Doppler de ondas eletromagnéticas

- Já vimos que o efeito Doppler é uma mudança de frequência que ocorre quando a fonte ou o emissor aproxima-se ou afasta-se do receptor.
- As equações que deduzimos para os diversos casos foram as seguintes:

$$f' = f_0 \frac{v \pm u_r}{v}$$

Fonte em repouso,
observador em movimento

$$f' = f_0 \frac{v}{v \mp u_e}$$

Fonte em movimento,
observador em repouso

$$f' = f_0 \left(\frac{v \pm u_r}{v} \right) \times \left(\frac{v}{v \mp u_e} \right) = f_0 \left(\frac{v \pm u_r}{v \mp u_e} \right)$$

Fonte e observador
em movimento

- No caso de ondas eletromagnéticas, a teoria da relatividade restrita estabelece que essas duas condições são <u>equivalentes</u>, i.e.:

observador em movimento, fonte em repouso

equivale a

observador em repouso, fonte em movimento

- Vamos tomar qualquer uma das equações anteriores para deduzir uma expressão para a variação da frequência (Δf) e do comprimento de onda ($\Delta\lambda$) devido ao efeito Doppler não-relativístico.

$$f' = f_0 \frac{v \pm u_r}{v} = f_0 \frac{c \pm u}{c}$$

$$f' - f_0 = \Delta f = f_0 \left(\frac{c \pm u}{c} \right) - f_0$$

$$\Delta f = f_0 \left(\frac{c \pm u}{c} - 1 \right)$$

$$\Delta f = f_0 \left(\frac{c \pm u - c}{c} \right)$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\pm u}{c}$$

onde f_0 é a frequência originalmente emitida, *c é* a velocidade da luz e *u* é a componente da velocidade na direção do objeto. Na prática, a razão *u/c* é muito pequena, mas Δf não é pequeno porque as frequências de ondas eletromagnéticas geralmente são muito elevadas.

Vamos proceder agora ao cálculo da variação em comprimento de onda correspondente:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \rightarrow \lambda_0 = \frac{c}{f_0}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{c}{f'} - \frac{c}{f_0}$$

$$\Delta\lambda = \frac{c}{f_0\left(\frac{c \pm u}{c}\right)} - \frac{c}{f_0}$$

$$\Delta\lambda = \frac{c - \left(\frac{c \pm u}{c}\right) c}{f_0 \left(\frac{c \pm u}{c}\right)} = \frac{c - (c \pm u)}{\frac{c}{\lambda_0}\left(\frac{c \pm u}{c}\right)}$$

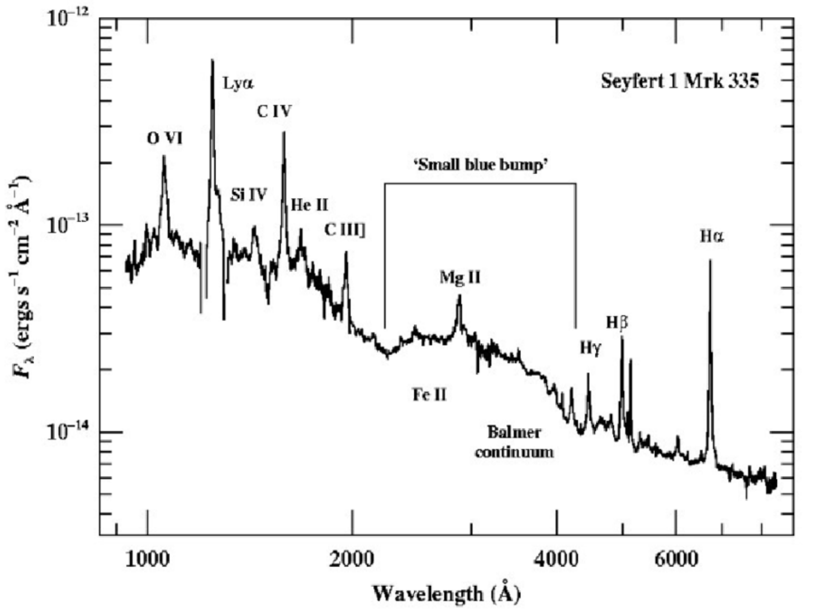
$$\Delta\lambda = \left(\frac{\pm u}{c \pm u}\right)\lambda_0$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\pm u}{c \pm u} \simeq \frac{\pm u}{c}$$

pois, como já comentamos, em geral u << c.

<u>Exemplo</u>: uma galáxia emite o espectro abaixo, que contém diversas linhas de emissão. A linha Hα, que corresponde à transição atômica entre os níveis 2 e 3 do hidrogênio, aparece com seu comprimento de onda alterado: 6570 A, enquanto o comprimento de onda de laboratório desta linha é de 6563 A.
Calcule a velocidade radial desta galáxia. Ela está se aproximando ou se afastando de nós?

<u>Sol</u>.: O desvio Doppler é $\Delta\lambda$ = 6570 A – 6563 A = 7 A



A velocidade radial da galáxia é portanto:

$$u = (\Delta\lambda / \lambda_0) \times c = (7 / 6563) \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$u = 320 \text{ km/s}$$

Como o comprimento de onda aparece <u>maior</u> que o de laboratório, a galáxia está se <u>afastando</u> do observador.

Fim