

# Ondas eletromagnéticas

## Parte 1

Fundamentos de física para gestão  
ambiental – 2016

Conteúdo - Halliday 8ª ed. Cap.33

O que é luz?

## *Luz: conceito e definições*

Sempre nos indagamos a respeito de sua natureza

Platão (427-347AC): todo objeto visível emite uma corrente constante de partículas luminosas captadas pelos olhos

Aristóteles (384-322AC): acreditava sair de nossos olhos uma onda vibratória que atingia os objetos e tornava-os visíveis.

Duas teorias para a natureza da luz:

Partículas **OU** Ondas

```
graph TD; A[Partículas OU Ondas] --> B[O pessoal da teoria de partículas dizia que a luz se comportava como gotas de água saindo de uma mangueira]; A --> C[O pessoal da teoria ondulatória imaginava que a luz se comportava igualmente a ondas formadas por uma pedra ao cair em um lago.];
```

O pessoal da teoria de partículas dizia que a luz se comportava como gotas de água saindo de uma mangueira

O pessoal da teoria ondulatória imaginava que a luz se comportava igualmente a ondas formadas por uma pedra ao cair em um lago.

as descobertas...

Heron de Alexandria (10AC-75): as leis básicas de Reflexão e Propagação Retilínea da Luz

Mas... notou-se que a luz parecia mudar de direção no novo meio líquido

1621: Wilbord Snell (1580-1626) descobriu experimentalmente a Lei da Refração:  
**ao penetrar num novo meio os raios mudam de direção** continuando a se propagar em  
linha reta após a mudança de meio

1678: Christiaan Huygens (1629-1695) o quanto a luz era desviada da sua trajetória inicial  
dependia da velocidade que a luz atravessava no meio.

A luz como um movimento ondulatório → **o índice de refração** maior quanto menor fosse a  
velocidade com a qual a luz penetrasse no meio

Como partícula: num meio mais denso, a velocidade seria maior, porque as partículas seriam atraídas pelas moléculas → idéia defendida por Isaac  
Newton (1643-1727).

## Os percalços...

### a teoria ondulatória deveria:

explicar como a luz propagava-se no vácuo (como é o caso da luz do Sol que chega na Terra)

...mas, de acordo com a teoria ondulatória que se tinha na época as ondas precisavam de um meio para se propagarem

Para resolver esse impasse: → Huygens: existência de um meio elástico e imponderável: éter

### a teoria de partículas deveria:

lidar com o fato de que dois raios luminosos cruzam-se sem que um interfira no outro

Apesar de seus problemas: durante ~ todo o século XVIII a teoria corpuscular prevaleceu

principalmente em razão do maior prestígio de Newton no meio científico

Mas, outros experimentos reforçavam o caráter ondulatório da luz

Difração (estudado pelo cientista italiano Francesco Grimaldi)

Padrões de Interferência produzidos pela luz ao atravessar uma fenda (Franjas de Young, Thomas Young).

Leon Foucault: mostra que a velocidade da luz era menor na água que no ar, como previa Huygens

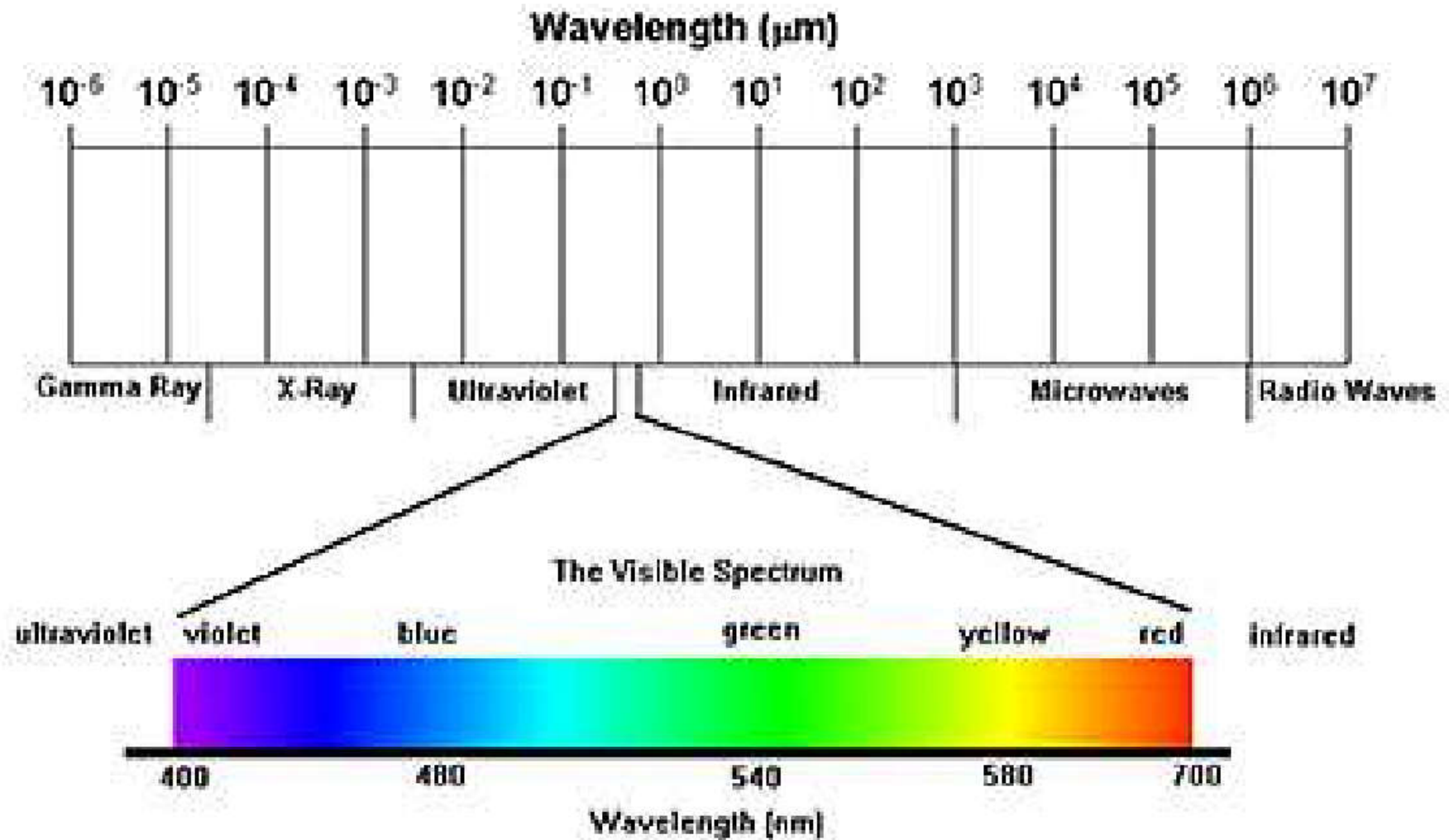
Passa a predominar a teoria ondulatória



Aperfeiçoada até a

teoria ondulatória eletromagnética do físico escocês James Clerk Maxwell (1865) que propôs ser a luz constituída pelas denominadas ondas eletromagnéticas, e que **a luz visível era apenas uma pequena parte (que pode ser enxergada por nós) de um espectro muito maior**

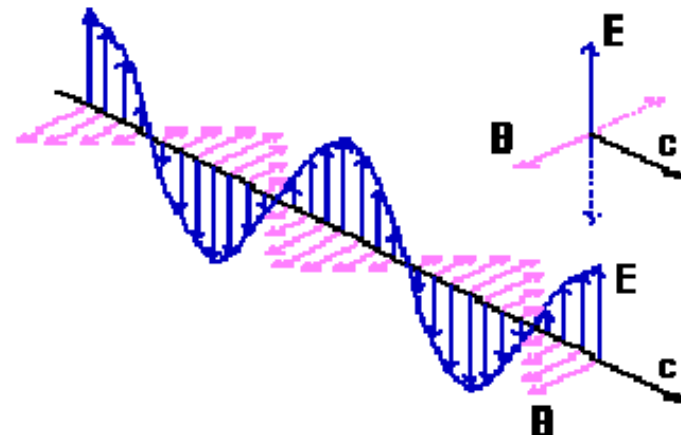
## A arco-íris de Maxwell



# Ondas eletromagnéticas

$$E = E_m \text{ sen } (kx - \omega t), \text{ onde } k = 2\pi/\lambda \quad \text{e} \quad \omega = 2\pi f$$

$$B = B_m \text{ sen } (kx - \omega t)$$





# Maxwell

Escreveu.....

...baseado em:

1. Lei de Gauss para a eletricidade

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Da Lei de Coulomb:

$$E = \frac{kQ_{source}}{r^2} \quad \text{ numa superfície esférica fechada:}$$

Deriva-se a Lei de Gauss:  $\epsilon_0 \phi = q_{env}$

2. Lei de Gauss para o magnetismo

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Como não existem monopólos magnéticos, o fluxo de B para fora é sempre igual ao de B para dentro da superfície gaussiana

3. Lei de Faraday para a indução

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

**Lei de Faraday:** a variação temporal de um campo magnético no espaço gera campo elétrico caso

$$\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{E}$$

4. Lei de Ampère-Maxwell

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

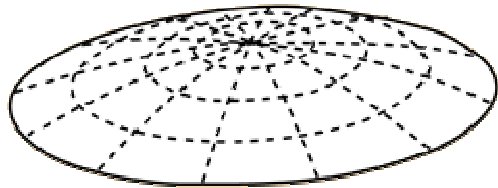
B induzidos e Lei de Ampère,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i \cdot$$

As equações de Maxwell contém a função de onda para as ondas eletromagnéticas:

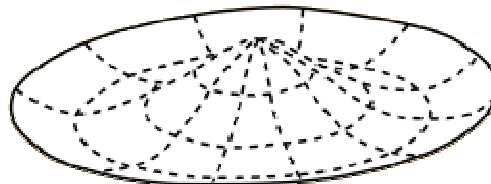
$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2}$$

Mode 01



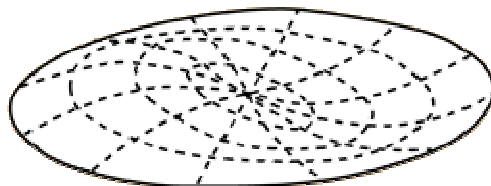
This is the lowest frequency mode  $f_1$

02



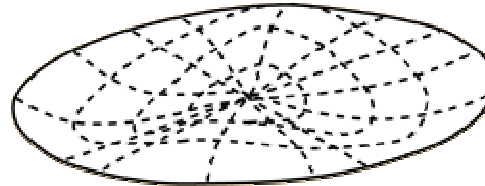
$2.30 f_1$

Mode 11



$1.59 f_1$

21



$2.14 f_1$

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

Além disso:

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

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

**Carregam energia na forma:**

**vetor de Poynting ( $\vec{S}$ )**

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

$$S = \left( \frac{\text{energia/tempo}}{\text{área}} \right)_{inst}$$
$$= \left( \frac{\text{potência}}{\text{área}} \right)_{inst}$$

$$S = W/s^2$$

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB$$



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

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

A energia média transportada é a intensidade ( $I$ ) da onda:

$$I = S_{m\u00e9dia} = \left( \frac{\text{energia/tempo}}{\text{\u00e1rea}} \right)_{m\u00e9dia} = \left( \frac{\text{pot\u00eancia}}{\text{\u00e1rea}} \right)_{m\u00e9dia}$$

$$I = \frac{1}{c\mu_0} (E^2)_{m\u00e9dia} = \frac{1}{c\mu_0} [E^2 \text{sen}^2(kx - \omega t)]_{m\u00e9dia}$$

Por defini\u00e7\u00e3o:

$$\text{sen}^2 \theta = \frac{1}{2} \quad E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Logo

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{rms}^2 \quad I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad \text{Varia\u00e7\u00e3o com a dist\u00e2ncia}$$

# Pressão de radiação

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c} \quad \text{Absorção total}$$

$$\Delta p = \frac{2 \Delta U}{c} \quad \text{Incidência perpendicular e reflexão total}$$

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$I = \frac{\text{potência}}{\text{área}} = \frac{\text{energia/tempo}}{\text{área}}$$

$$\Delta U = IA \Delta t.$$

$$F = \frac{IA}{c} \quad (\text{absorção total}).$$

$$F = \frac{2IA}{c} \quad (\text{incidência perpendicular e reflexão total}).$$

$$p_r = \frac{I}{c} \quad (\text{absorção total})$$

$$p_r = \frac{2I}{c} \quad (\text{incidência perpendicular e reflexão total})$$

# A luz como onda

Obedece à Teoria Ondulatória

onda transversal

Comprimento }  
Frequência } característicos





A luz também pode ser medida pela sua frequência, que é chamada  $\nu$ . A frequência, por definição refere-se ao inverso do tempo de repetição, ou seja do tempo gasto pela onda para repetir sua condição inicial. No caso da luz visível a frequência está relacionada com a “cor” desta, por exemplo no espectro visível, a luz vermelha tem uma frequência menor que luz azul.

$$\nu = c/\lambda$$

A velocidade  $\mathbf{v}$  da luz em um meio que não seja ar ou vácuo depende das características desse meio.

O índice de refração  $n$  é um parâmetro que caracteriza um meio óptico e é definido:

$$n = c/\mathbf{v}$$

Como  $c > \mathbf{v}$  para qualquer meio óptico, então sempre teremos  $n > 1$ . Para ar ou vácuo, temos  $n = 1$ .

Os valores de  $n$  para outros meios estão relacionados na tabela a seguir:

Índice de Refração de Algumas Substâncias (Valores Correspondentes à Luz Amarela)

<b>Substância</b>	<b><math>n</math></b>
Ar (CNPT)	1,000
Água a 20°C	1,333
Acetona a 20°C	1,358
Etanol a 20°C	1,360
Diamante	2,4168
Cristal de quartzo	1,553
Quartzo fundido	1,458
<i>Flint glass</i>	1,650
Cloreto de sódio	1,544
Lente do olho	1,424
Humor vítreo	1,336

# Polarização

Luz despolarizada

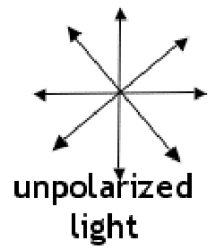


FIGURE 1

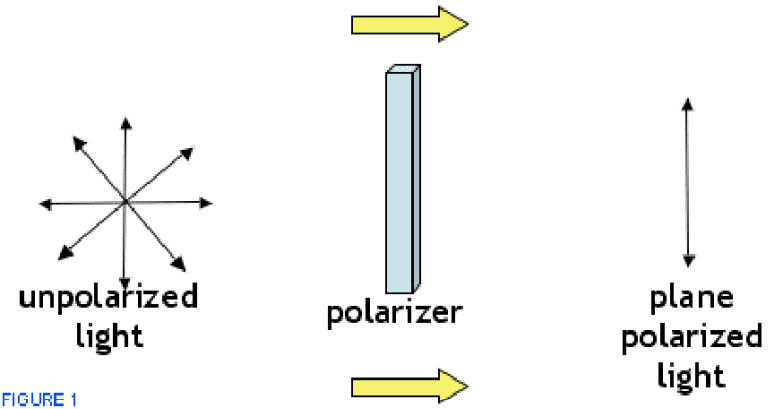
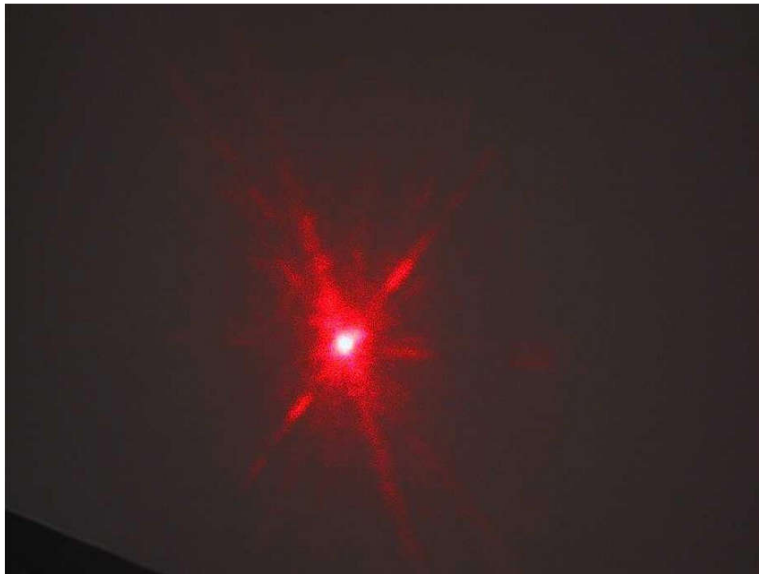


FIGURE 1



➡ A componente do campo elétrico paralela à direção de polarização é transmitida por um filtro polarizador; a componente perpendicular é absorvida.

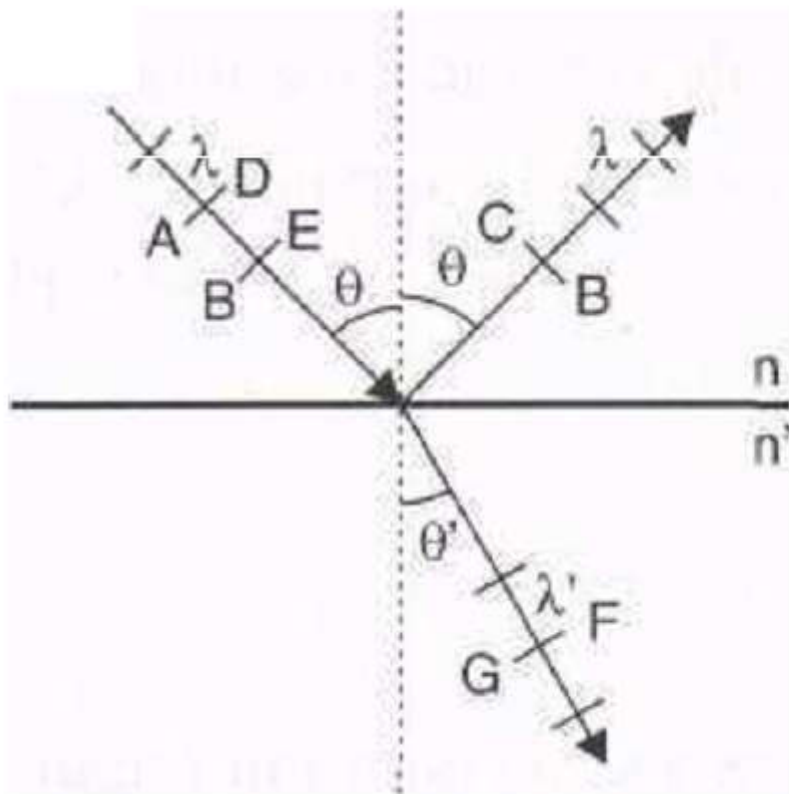
$$I = \frac{1}{2}I_0$$

$$E_y = E \cos \theta.$$

$$I = I_0 \cos^2 \theta.$$

## reflexão e refração

Toda vez que a luz incide sobre a superfície que separa dois meios ópticos, que são **transparentes à luz**, essa será **refletida e refratada**. O comprimento da onda refletida ( $\lambda_{\text{reflet}}$ ) será o mesmo que o da onda incidente ( $\lambda_{\text{incid}}$ ); já o comprimento da onda refratada ( $\lambda_{\text{refrat}}$ ) será diferente.



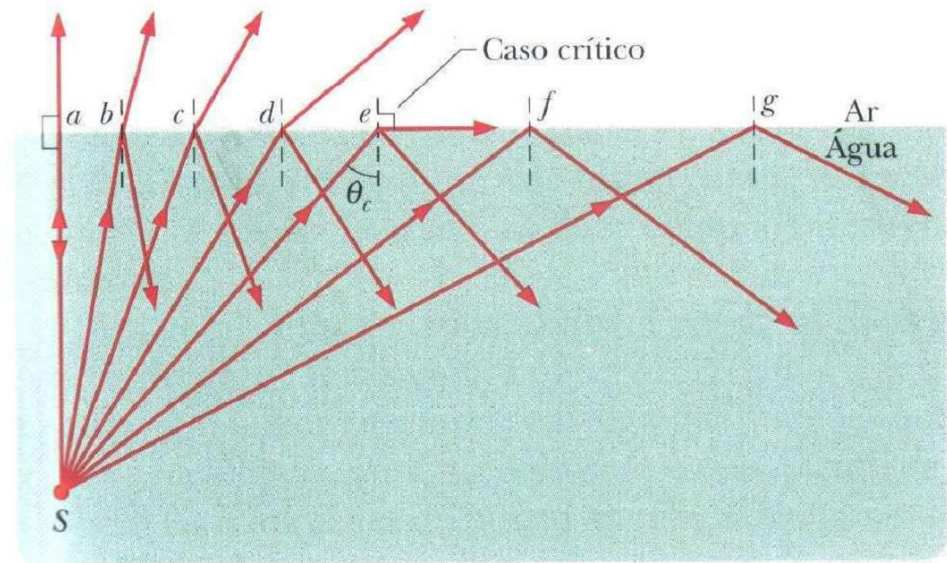
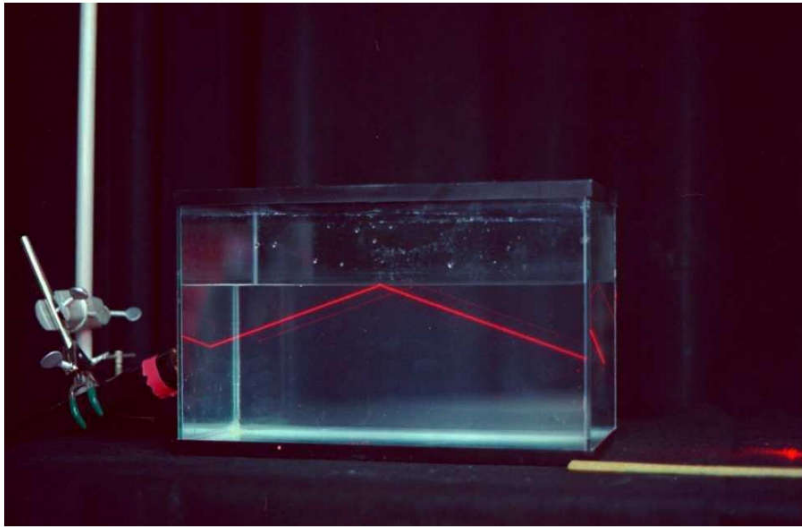
$$n \cdot \text{sen} \theta = n' \cdot \text{sen} \theta'$$

## Dispersão cromática

Se  $n$  depende de  $\lambda$   $\longrightarrow$  O ângulo de refração será diferente para diferentes raios luminosos



## Reflexão interna total



$$\theta_1 = \theta_c, \theta_2 = 90^\circ$$

$$n_1 \text{ sen } \theta_c = n_2 \text{ sen } 90^\circ,$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ângulo crítico}).$$

# Lei de Brewster

$$\theta_B + \theta_r = 90^\circ$$

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_B = n_2 \operatorname{sen} \theta_r.$$

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_B = n_2 \operatorname{sen}(90^\circ - \theta_B) = n_2 \operatorname{cos} \theta_B,$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ângulo de Brewster})$$

$$\theta_B = \tan^{-1} n \quad (\text{lei de Brewster}).$$