

Ondas Eletromagnéticas

Óptica e Física Moderna

5 de agosto de 2022

Fonte

Fonte deste material: Halliday, Resnick, Walker; Fundamentos de Física; Volume 4 - Mecânica; 8^a Edição, LTC

Sumário

O Arco-íris de Maxwell

Descrição Qualitativa de Uma Onda Eletromagnética

Transporte de Energia e Vetor de Poynting

Pressão da Radiação

Polarização

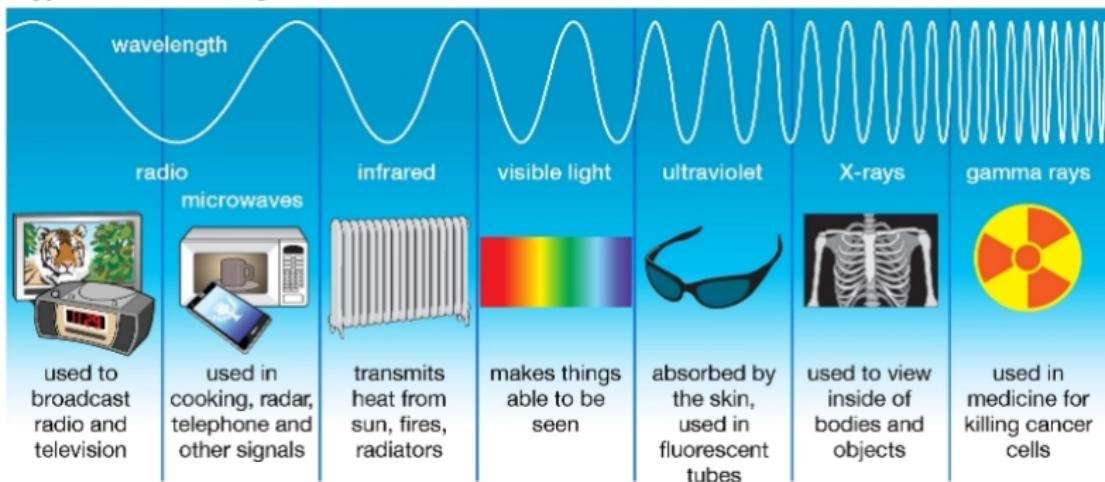
Reflexão e Refração

Reflexão Interna Total

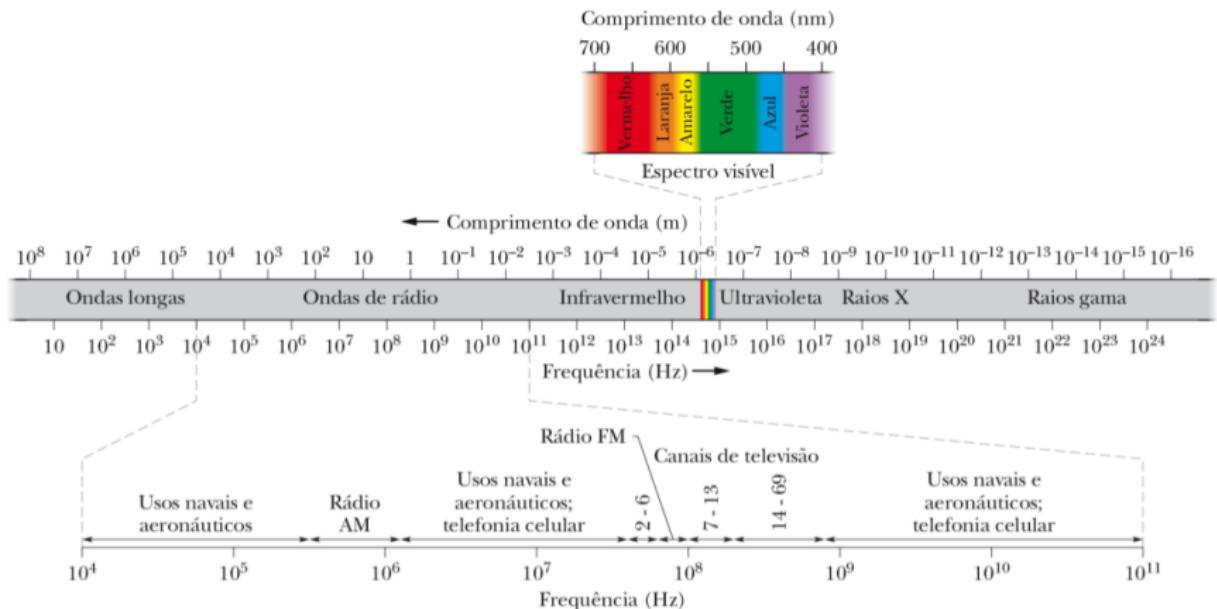
Polarização por Reflexão

O Arco-íris de Maxwell

Types of Electromagnetic Radiation



O Arco-íris de Maxwell



O Arco-íris de Maxwell

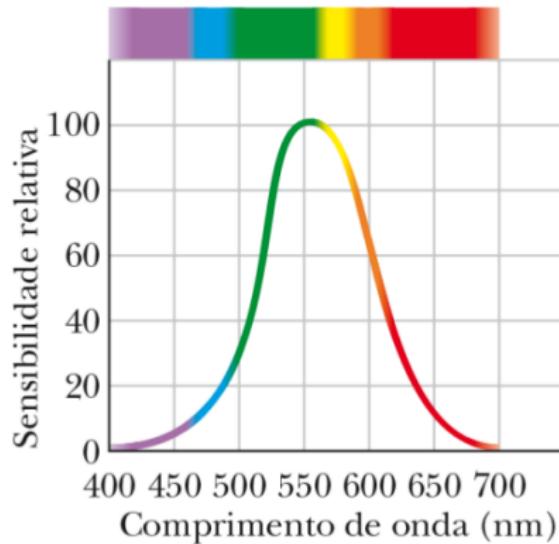


Figura 33-2 Sensibilidade relativa do olho humano a ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos de onda. A parte do espectro eletromagnético à qual o olho é sensível é chamada de *luz visível*.

O Arco-íris de Maxwell

Equações de Maxwell no vácuo

Lei de Gauss

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

**Lei de Gauss do
Magnetismo**

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

**Equação de
Maxwell-Faraday**

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

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

Lei de Ampère

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

O Arco-íris de Maxwell

Equações de Maxwell no vácuo

Aplicando o rotacional às equações com rotacional:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \nabla \times \left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Aplicando a identidade do rotacional $\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \vec{\nabla}(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$:

$$\vec{\nabla}(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \vec{B}) \quad \vec{\nabla}(\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \vec{E})$$
$$-\nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right) \quad -\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right)$$

O Arco-íris de Maxwell

Equações de Maxwell no vácuo

Chegamos então às **equações da onda**:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

que descrevem a propagação de ondas com velocidade

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

- μ_0 é a **permeabilidade magnética do vácuo**, ou **constante magnética**.

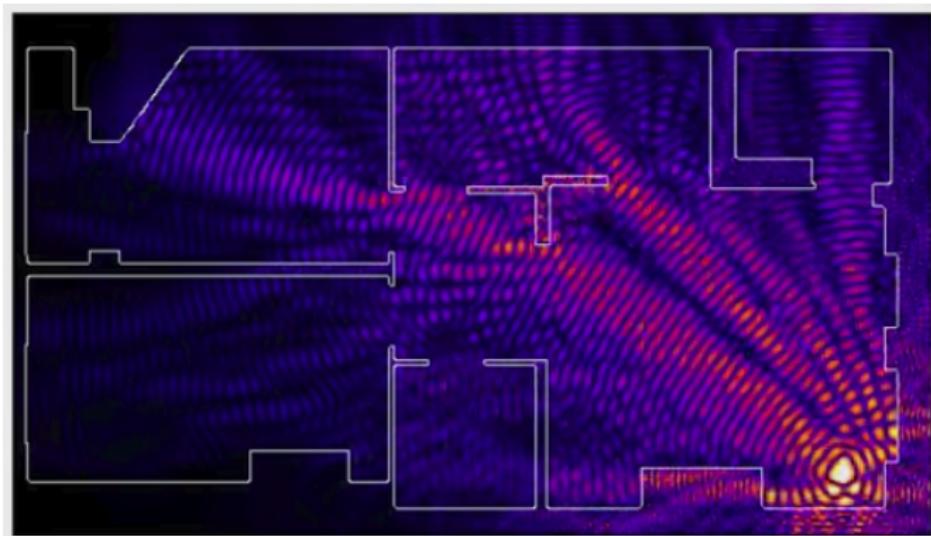
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

- ε_0 é a **permissividade elétrica do vácuo**, ou **constante elétrica**.

$$\varepsilon_0 = 8,8541878128 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Sinal de Wi-fi

onde instalar um roteador de Wi-fi?



Fonte: <https://jasmcole.com/2014/08/25/helmhurts/>

Descrição Qualitativa de Uma Onda Eletromagnética

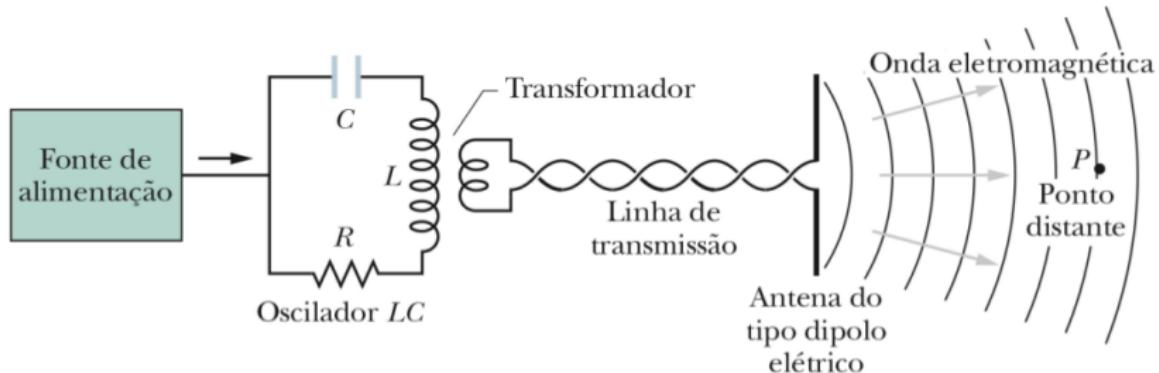
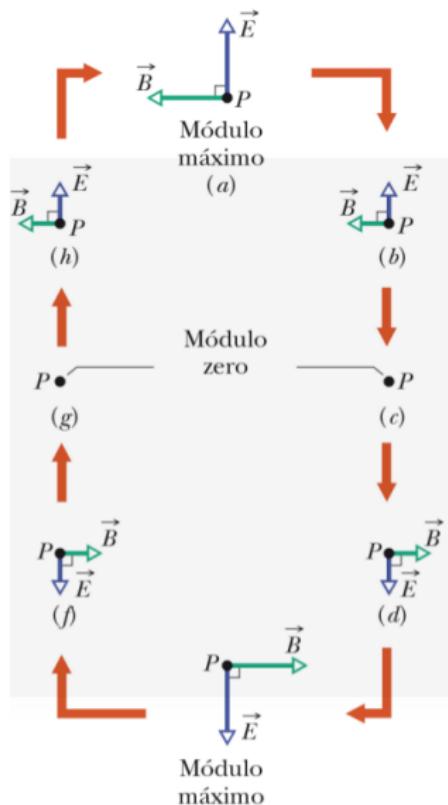
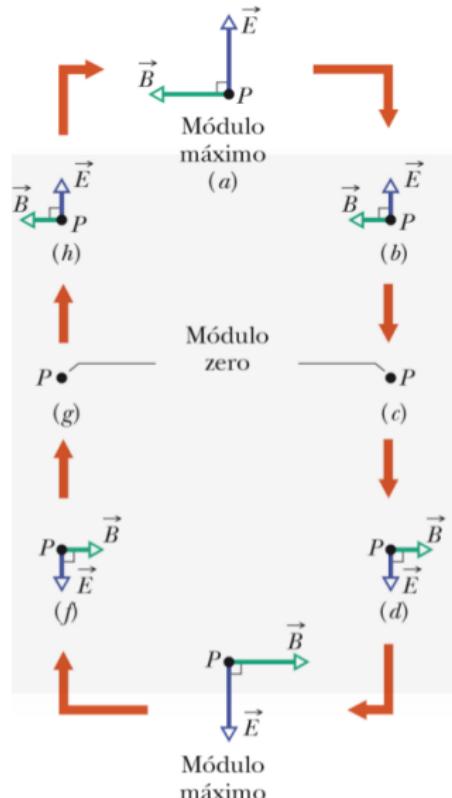


Figura 33-3 Sistema usado para gerar uma onda eletromagnética na região de ondas curtas de rádio do espectro eletromagnético: um oscilador LC produz uma corrente senoidal na antena, que gera a onda. P é um ponto distante no qual um detector pode indicar a presença da onda.

Descrição Qualitativa de Uma Onda Eletromagnética



Descrição Qualitativa de Uma Onda Eletromagnética



1. Os campos elétrico e magnético \vec{E} e \vec{B} são perpendiculares à direção de propagação da onda, ou seja, a onda eletromagnética é uma onda transversal.
2. O campo elétrico é perpendicular ao campo magnético.
3. O produto vetorial $\vec{E} \times \vec{B}$ aponta no sentido de propagação da onda.
4. Os campos variam senoidalmente. Além disso, têm a mesma frequência e estão em fase.

Descrição Qualitativa de Uma Onda Eletromagnética

$$E = E_m \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

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

Velocidade da Onda

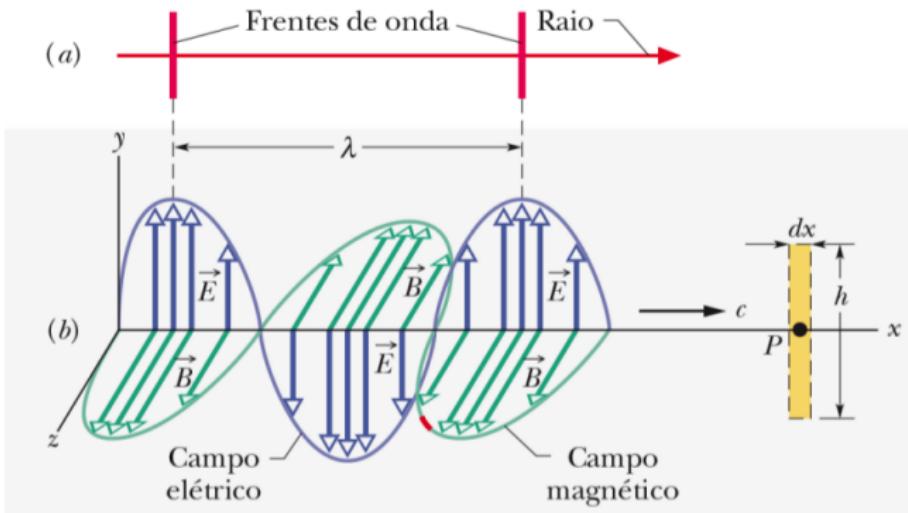
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

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

Descrição Qualitativa de Uma Onda Eletromagnética

Razão dos Módulos

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



Transporte de Energia e Vetor de Poynting

Vetor de Poynting

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

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

A direção do vetor de Poynting \vec{S} de uma onda eletromagnética em um ponto qualquer do espaço indica a direção de propagação da onda e a direção de transporte de energia desse ponto.

Transporte de Energia e Vetor de Poynting

Módulo do Vetor de Poynting

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

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

Transporte de Energia e Vetor de Poynting

Intensidade

$$I = S_{\text{méd}} = \left(\frac{\text{energia/tempo}}{\text{área}} \right)_{\text{méd}} = \left(\frac{\text{potência}}{\text{área}} \right)_{\text{méd}}$$

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

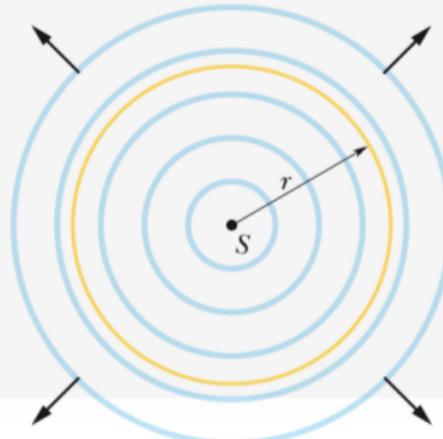
Seja o valor médio quadrático do campo elétrico:

$$E_{\text{rms}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{\text{rms}}^2$$

Transporte de Energia e Vetor de Poynting

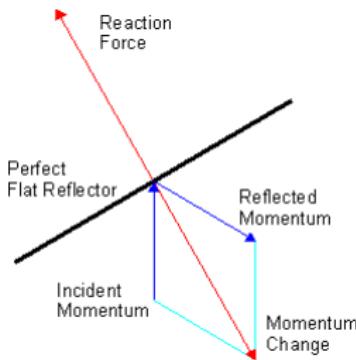
Toda a energia emitida pela fonte luminosa S passa pela superfície de uma esfera de raio r .



$$I = \frac{\text{potência}}{\text{área}} = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$

Pressão da Radiação

- ▶ Além de energia, as ondas eletromagnéticas possuem **momento linear**.
- ▶ Podemos exercer uma **pressão de radiação** sobre um objeto iluminando o objeto.
- ▶ Entretanto, essa pressão é muito pequena.



Pressão da Radiação

Radiação totalmente absorvida

- ▶ Seja um objeto (livre para se mover) submetido a um feixe de radiação eletromagnética durante um intervalo de tempo Δt .
- ▶ Suponha que a radiação seja totalmente **absorvida** pelo corpo.
- ▶ O objeto recebe uma energia ΔU da radiação.
- ▶ Maxwell demonstrou que o objeto recebe **momento linear**.
- ▶ O módulo da variação de momento do objeto é dado por:

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c} \quad (\text{absorção total})$$

em que c é a velocidade da luz.

Pressão da Radiação

Radiação totalmente refletida

- ▶ A radiação também pode ser **refletida** pelo objeto.
- ▶ Se a radiação é totalmente refletida e a incidência é perpendicular, o módulo da variação do momento é dado por:

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

Radiação parcialmente absorvida

- ▶ Quando a radiação é parcialmente absorvida e parcialmente refletida, a variação do momento do corpo tem um valor entre $\frac{\Delta U}{c}$ e $\frac{2\Delta U}{c}$.

Pressão da Radiação

Força

- ▶ Lembrando que a intensidade da radiação é dada por:

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

- ▶ Suponha que uma superfície plana de área A , perpendicular à direção da radiação, intercepta a radiação. Assim:

$$I = \frac{\Delta U / \Delta t}{A}$$

- ▶ A energia interceptada pela superfície durante o intervalo de tempo Δt é dada por

$$\Delta U = I A \Delta t$$

Pressão da Radiação

Força - absorção total

- Se a **energia é totalmente absorvida**: $\Delta p = \frac{\Delta U}{c}$
- Assim: $\Delta p = \frac{(I A \Delta t)}{c}$
- De acordo com a segunda lei de Newton: $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$
- O módulo da força exercida sobre a superfície é

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

Pressão da Radiação

Força - reflexão total

- Se a **energia é totalmente refletida**: $\Delta p = \frac{2 \Delta U}{c}$
- Assim: $\Delta p = \frac{2 (I A \Delta t)}{c}$
- O módulo da força exercida sobre a superfície é

$$F = \frac{2 I A}{c} \quad (\text{reflexão total})$$

Pressão da Radiação

Força

- ▶ Se a **radiação é parcialmente absorvida e parcialmente refletida**:
 - ▶ o **módulo da força** exercida sobre a superfície tem um valor entre

$$\frac{IA}{c} \quad \text{e} \quad \frac{2IA}{c}$$

Pressão da Radiação

Pressão - absorção total

- ▶ A força por unidade de área exercida pela radiação é a pressão de radiação p_r .
- ▶ Se a **energia é totalmente absorvida**, o módulo da força exercida sobre a superfície é $F = \frac{I A}{c}$.
- ▶ Dividindo a força pela área A :

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

Pressão da Radiação

Pressão - reflexão total

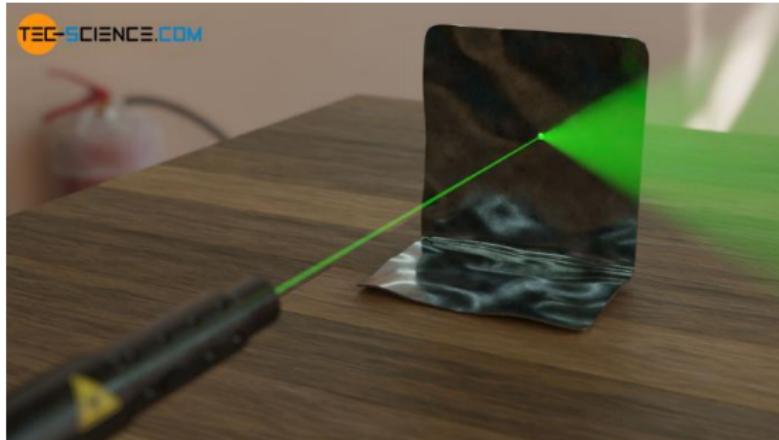
- ▶ Se a **energia é totalmente refletida**, o módulo da força exercida sobre a superfície é $F = \frac{2I}{c}A$.
- ▶ Dividindo a força pela área A :

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

Pressão da Radiação

Pressão

- ▶ A invenção do laser permitiu aos pesquisadores utilizar pressões de radiação consideráveis.
- ▶ Um feixe de laser pode ser focalizado em uma região com apenas alguns comprimentos de onda de diâmetro.

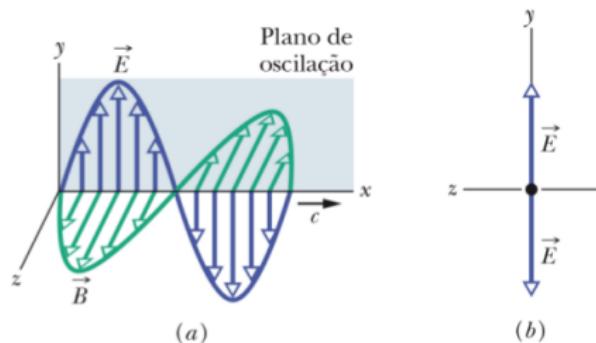


Polarização

Uma onda eletromagnética é polarizada se o campo elétrico da onda está sempre no mesmo plano. As ondas de luz emitidas por objetos incandescentes são não polarizadas, ou seja, a polarização varia aleatoriamente com o tempo.

Polarização

Plano de polarização: O plano que contém o vetor \vec{E} em instantes sucessivos de tempo.

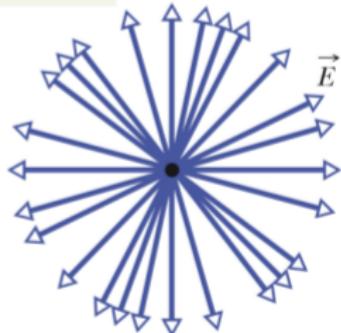


Luz polarizada verticalmente orientada para fora do papel; o campo elétrico é sempre vertical.

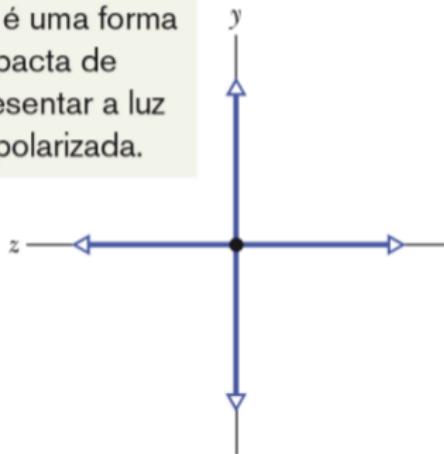
Figura 33-9 (a) O plano de oscilação de uma onda eletromagnética polarizada. (b) Para representar a polarização, mostramos uma vista frontal da onda e indicamos a direção das oscilações do campo elétrico por uma seta de duas cabeças.

Polarização

Luz não polarizada
orientada para
fora do papel;
o campo elétrico
está em todas as
direções do plano.



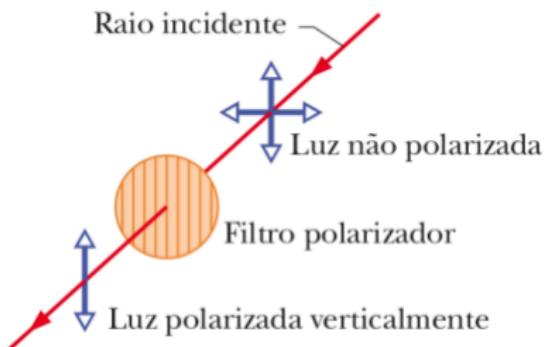
Esta é uma forma
compacta de
representar a luz
não polarizada.



Polarização

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

Como o eixo de polarização do filtro é vertical, apenas a luz polarizada verticalmente consegue atravessá-lo.



Polarização

Se a luz incidente é não polarizada, a luz transmitida tem metade da intensidade da luz incidente:

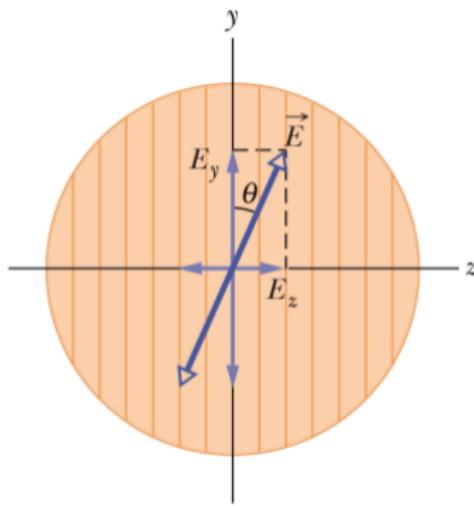
$$I = \frac{1}{2}I_0$$

Se a luz incidente é polarizada, a intensidade da luz transmitida depende do ângulo entre a direção de polarização da luz incidente e a direção de polarização do filtro.

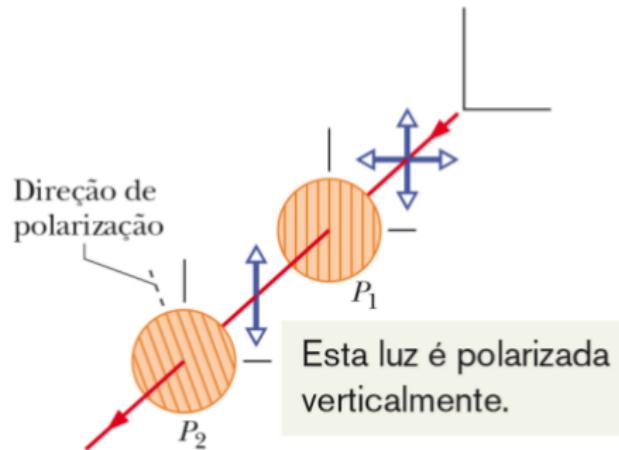
$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Polarização

Como o eixo de polarização do filtro é vertical, apenas a componente vertical do campo elétrico consegue atravessá-lo.

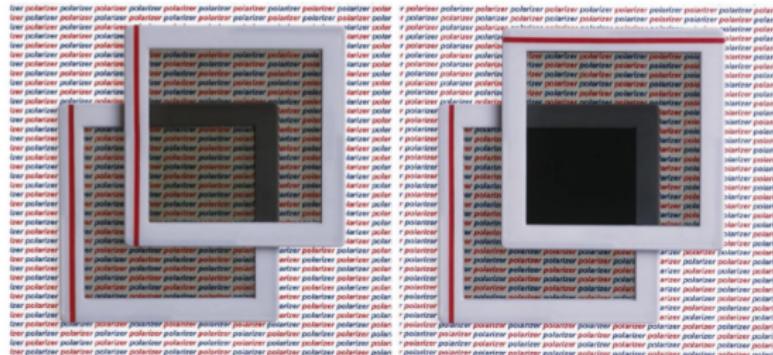


Polarização



Como o eixo de polarização
está inclinado, apenas uma
parte da luz consegue atravessá-lo.

Polarização



Richard Megna/Fundamental Photographs

(a)

(b)

Figura 33-14 (a) A maior parte da luz passa por duas placas polarizadoras quando a direção de polarização das placas coincide, mas (b) a maior parte da luz é absorvida quando as direções de polarização das duas placas são perpendiculares.

Polarização

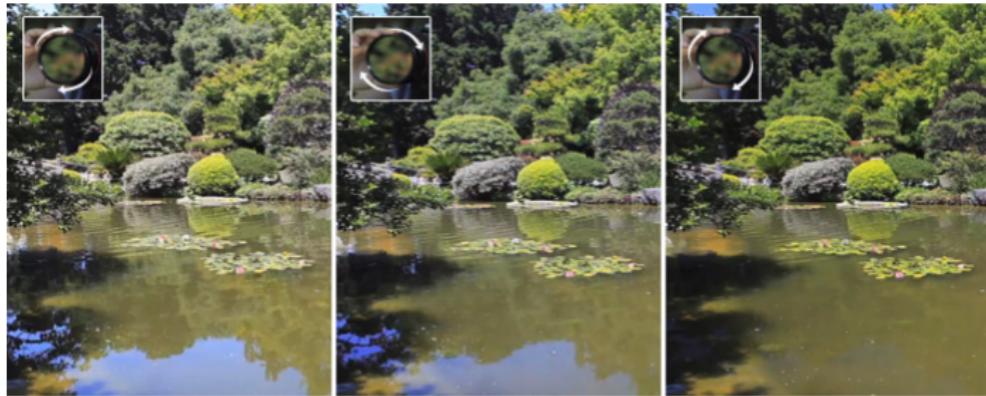


Polarização



Esquema mostra a captação dos raios de luz provindo de todas as direções, à esquerda, e os raios filtrados à direita (Foto: Adriano Hamaguchi)

Polarização



Comparativo de imagens de um lago e árvores ao fundo fotografados com filtro polarizador em diferentes ângulos (Foto: Reprodução/Olivia Speranza)

Polarização



Fotografia de corredeira sem o filtro polarizador à esquerda e com o filtro à direita (Foto: Reprodução/LEE Filters)

Polarização



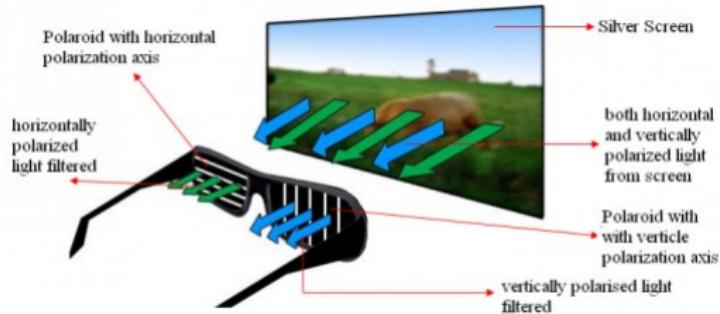
Duas imagens de construção e jardim fotografados com filtro polarizador em diferentes ângulos (Foto: Reprodução/Olivia Speranza)

Polarização



Farol com céu azul ao fundo com nuvens, fotografado sem filtro polarizador à esquerda, e com o filtro à direita (Foto: Reprodução/LEE Filters)

Polarização



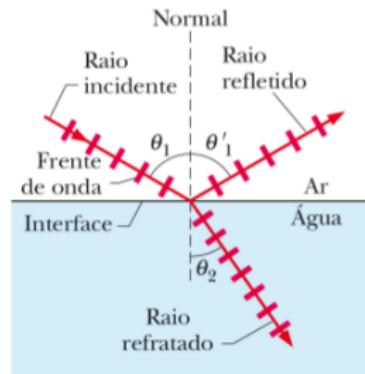
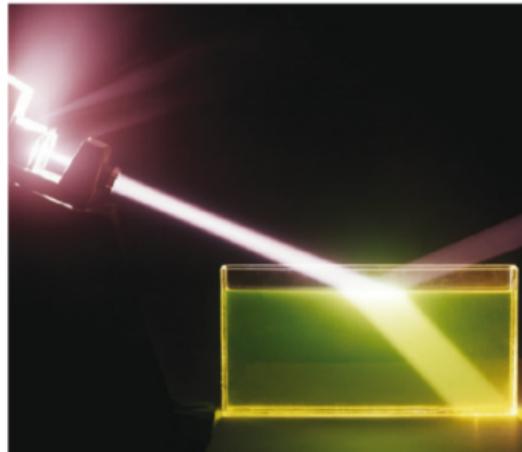
Labeled By Ali Khan

Reflexão e Refração

Lei da reflexão

O raio refletido está no plano de incidência e tem um **ângulo de reflexão** igual ao **ângulo de incidência**.

$$\theta'_1 = \theta_1$$



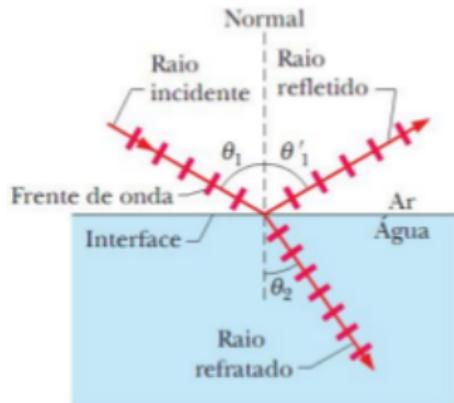
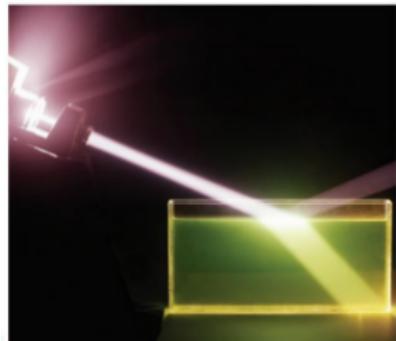
Reflexão e Refração

Lei da refração

O raio refratado está no plano de incidência e tem um ângulo de refração θ_2 que está relacionado ao ângulo de incidência θ_1 pela equação

$$n_2 \operatorname{sen} \theta_2 = n_1 \operatorname{sen} \theta_1$$

em que n_1 e n_2 são constantes adimensionais, denominadas índices de refração, que dependem do meio do qual a luz está se propagando.



Reflexão e Refração

Lei da refração

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

- ▶ Esta lei foi descoberta experimentalmente pelo holandês Willebrord van Royen Snell (1591-1626).
- ▶ Mais tarde, a lei foi deduzida por René Descartes (1596-1650), a partir de sua teoria corpuscular da luz.
- ▶ Nos Estados Unidos, a lei é chamada de Lei de Snell;
- ▶ Na França, a lei é chamada de Lei de Descartes;
- ▶ Em Portugal e no Brasil é costume chamá-la de **Lei de Snell-Descartes**.



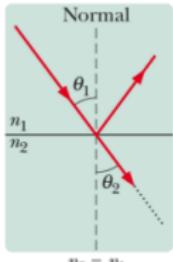
Reflexão e Refração

Table 1. Index of Refraction of Various Materials.

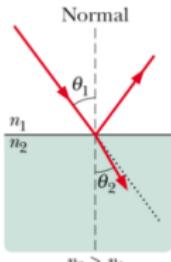
Material	Index of Refraction
Vacuum	1.0000
Air	1.0003
Water (pure)	1.3330
Seawater (35 ppt)	1.3394
Ethyl alcohol	1.361
Sugar solution (80% sugar)	1.49
Glass (soda lime)	1.510
Bromine (liquid)	1.661
Ruby	1.760
Diamond	2.417

Para um comprimento de onda de 589 nm (luz amarela do sódio)

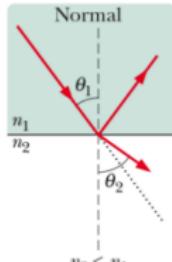
Reflexão e Refração



(a) Se os índices são iguais, a direção não muda.



(b) Se o segundo índice é maior, o raio se *aproxima* da normal.



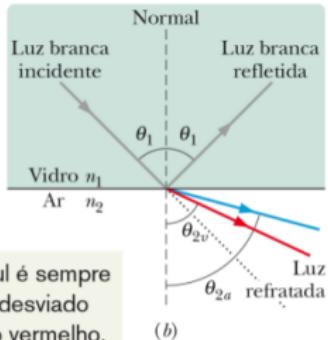
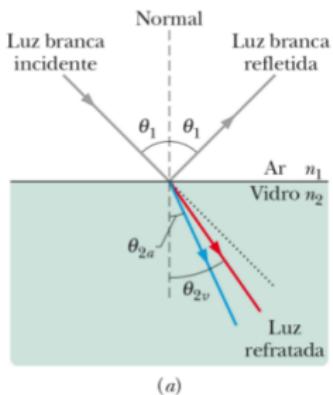
(c) Se o segundo índice é menor, o raio se *afasta* da normal.

Figura 33-17 A luz que estava se propagando em um meio de índice de refração n_1 incide em um meio de índice de refração n_2 . (a) Se $n_2 = n_1$, o raio luminoso não sofre um desvio; o raio refratado continua a se propagar na *mesma direção* (reta pontilhada). (b) Se $n_2 > n_1$, o raio luminoso é desviado para mais perto da normal. (c) Se $n_2 < n_1$, o raio luminoso é desviado para mais longe da normal.

Reflexão e Refração

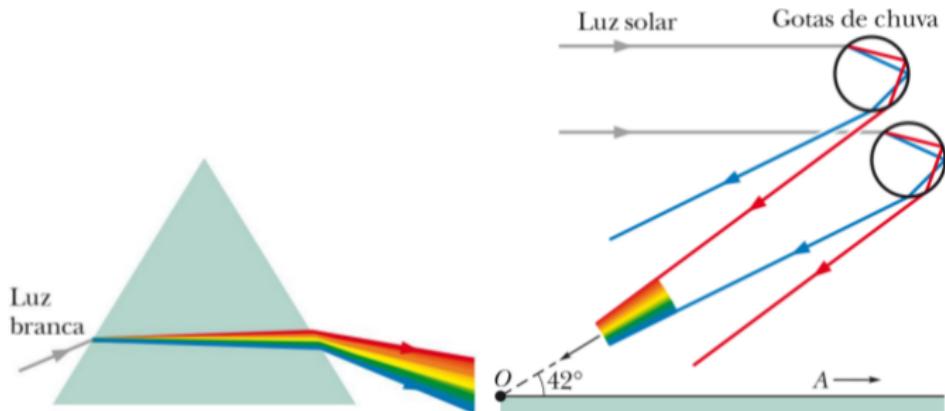
Dispersão Cromática

O índice de refração n para a luz em qualquer meio, exceto o vácuo, depende do comprimento de onda. Esse espalhamento da luz é conhecido como **dispersão cromática**.

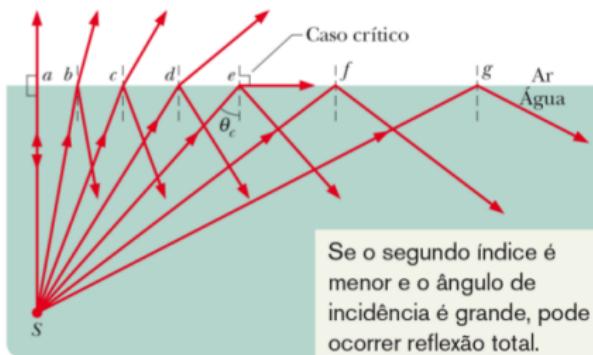


O azul é sempre mais desviado que o vermelho.

Reflexão e Refração



Reflexão Interna Total



Ken Kay/Fundamental Photographs

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

Para ângulos de incidência maiores que o **ângulo crítico** θ_c , não existe raio refratado, e toda a luz é refletida; o fenômeno é conhecido como **reflexão interna total**.

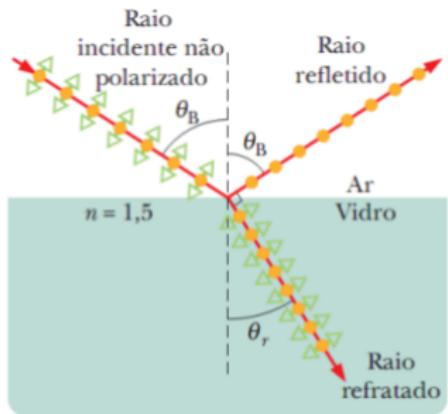
Polarização por Reflexão - Ângulo de Brewster

Ângulo de Brewster

- Uma onda refletida será totalmente polarizada, com o campo elétrico perpendicular ao plano de incidência, se incidir na interface com um ângulo igual ao **ângulo de Brewster** θ_B :

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

- Observa-se experimentalmente que θ_B é aquele para o qual os raios refletido e refratado são perpendiculares.



- Campo elétrico perpendicular ao papel
- Campo elétrico paralelo ao papel

Polarização por Reflexão

