



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

“LOB1021 - FÍSICA IV”

Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

Escola de Engenharia de Lorena (EEL)

Universidade de São Paulo (USP)

Polo Urbo-Industrial, Gleba AI-6 - Lorena, SP 12600-970

durval@demar.eel.usp.br

www.eel.usp.br – Comunidade – Alunos (Página dos professores)

Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5 - Caixa Postal 116
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Fax (12) 3153-3133
Tel. (Direto) (12) 3159-5007/3153-3209

USP Lorena
www.eel.usp.br

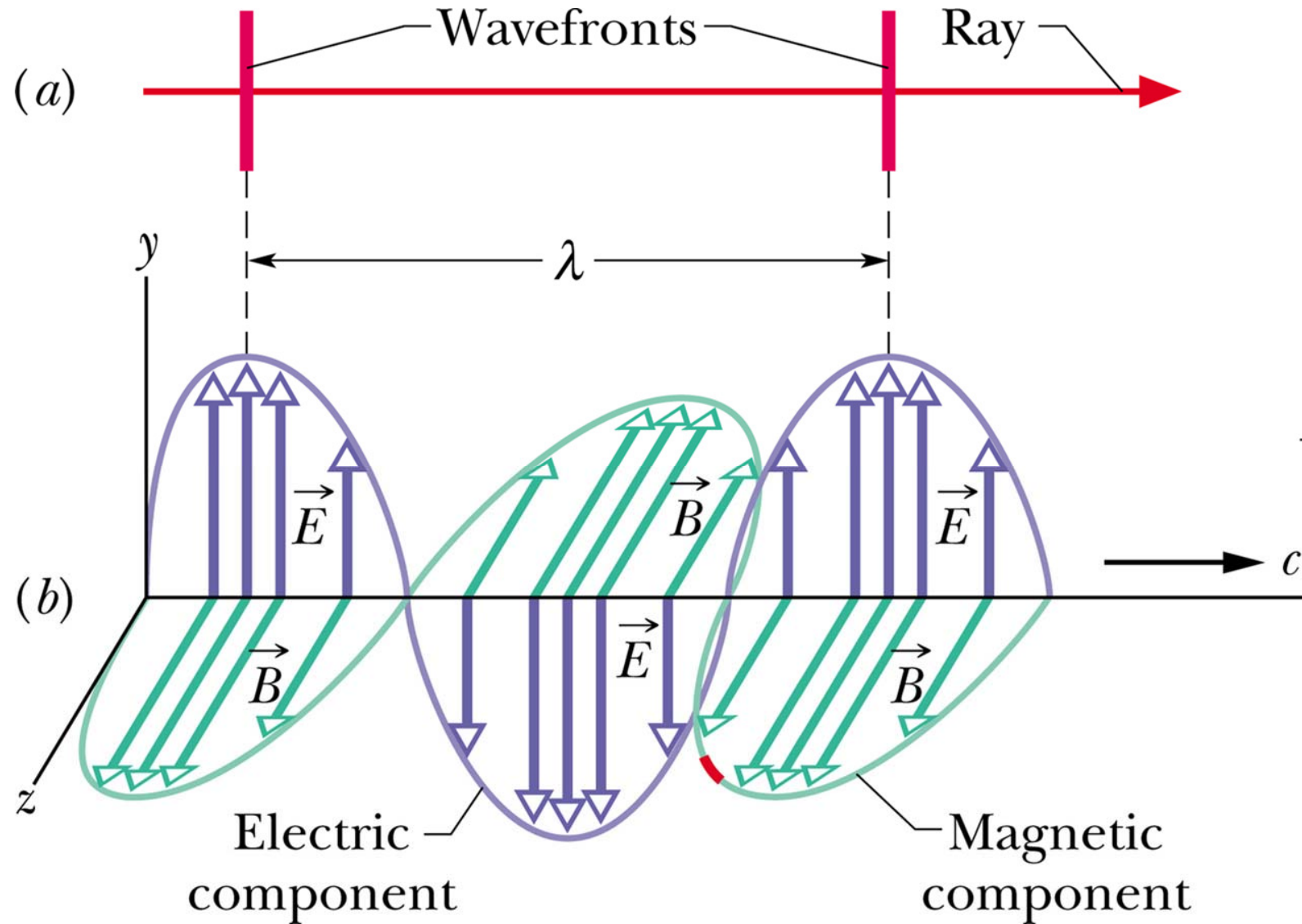
Polo Urbo-Industrial Gleba AI-6 - Caixa Postal 116
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Fax (12) 3153-3006
Tel. (PABX) (12) 3159-9900

UNIDADE 2 -

Reflexão e Refração

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração



Reflexão da Luz



Clique para acender
a luz e começar a
entender o fenômeno
da reflexão

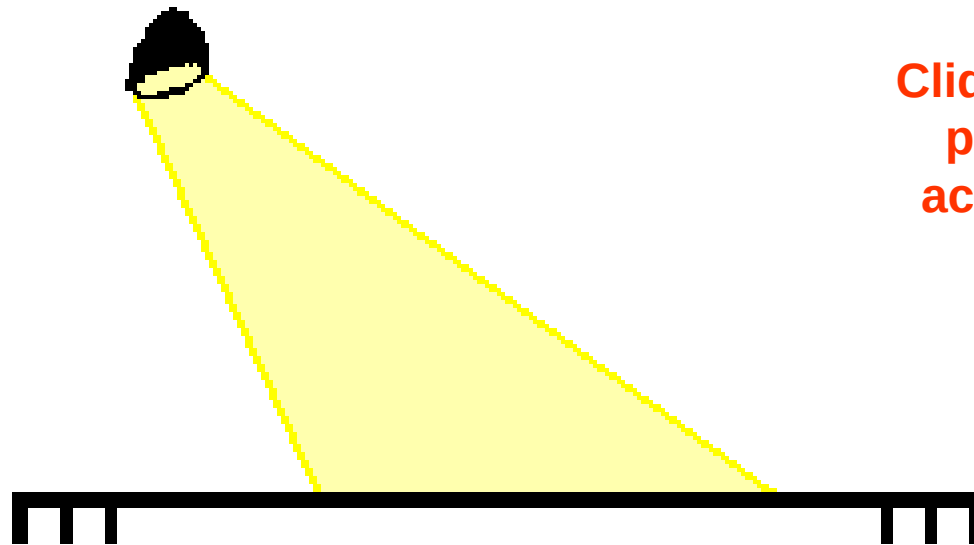
fonte de luz



superfície refletora

Aqui você pode ver a luz
chegando na superfície
refletora

fonte de luz

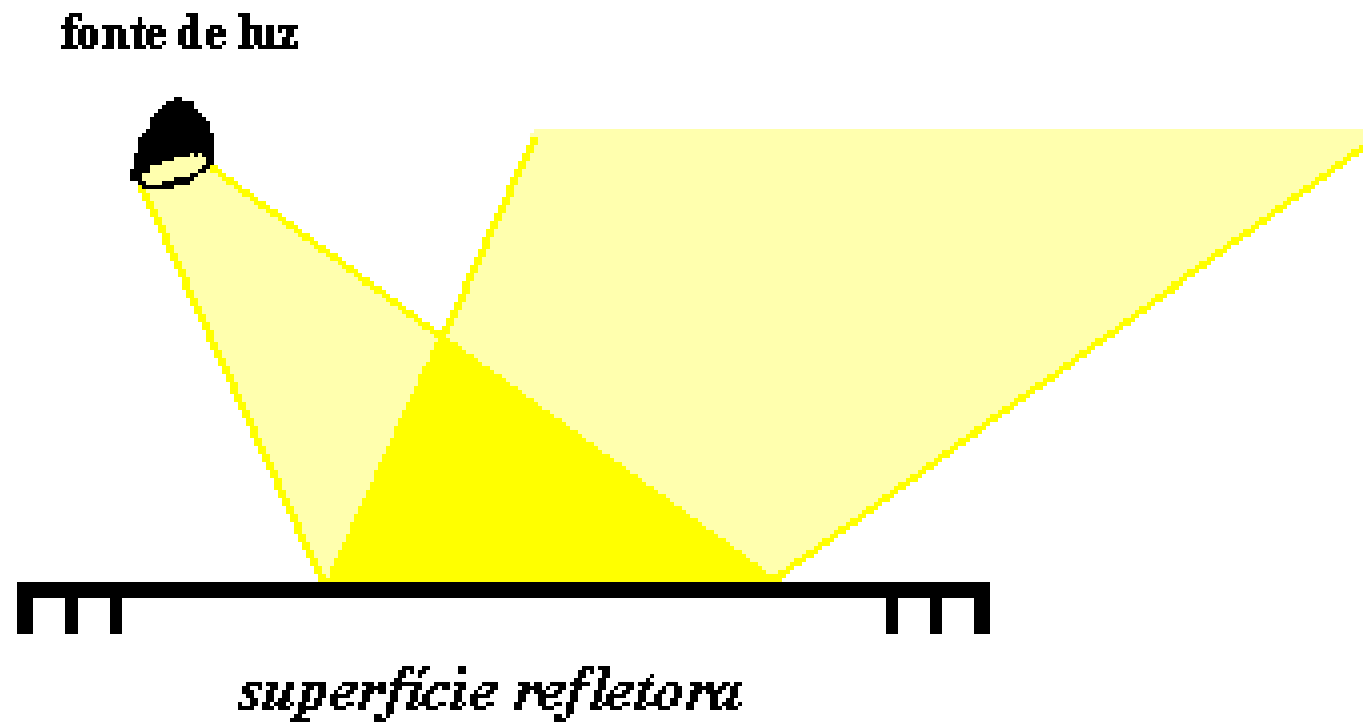


Clique novamente
para ver o que
acontece depois

superfície refletora

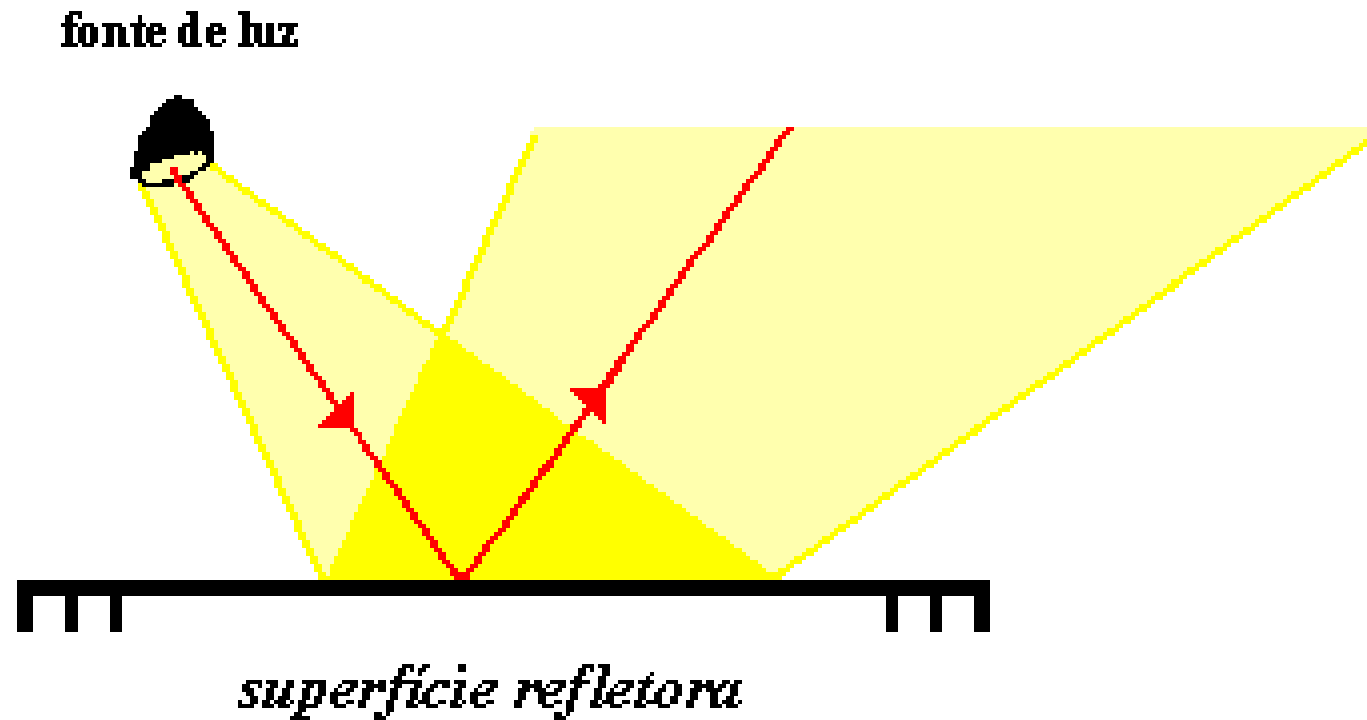
Agora vamos escolher um raio de luz deste pincel

Clique novamente



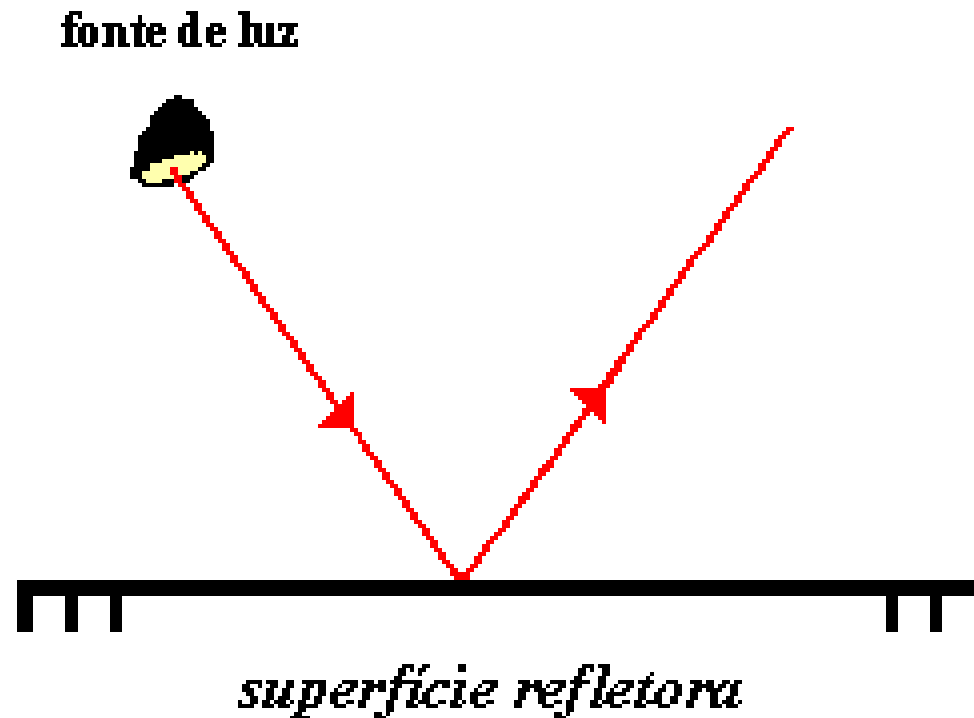
Ok, raio de luz escolhido !!!

Agora não precisamos mais do
pincel de luz. Clique novamente.



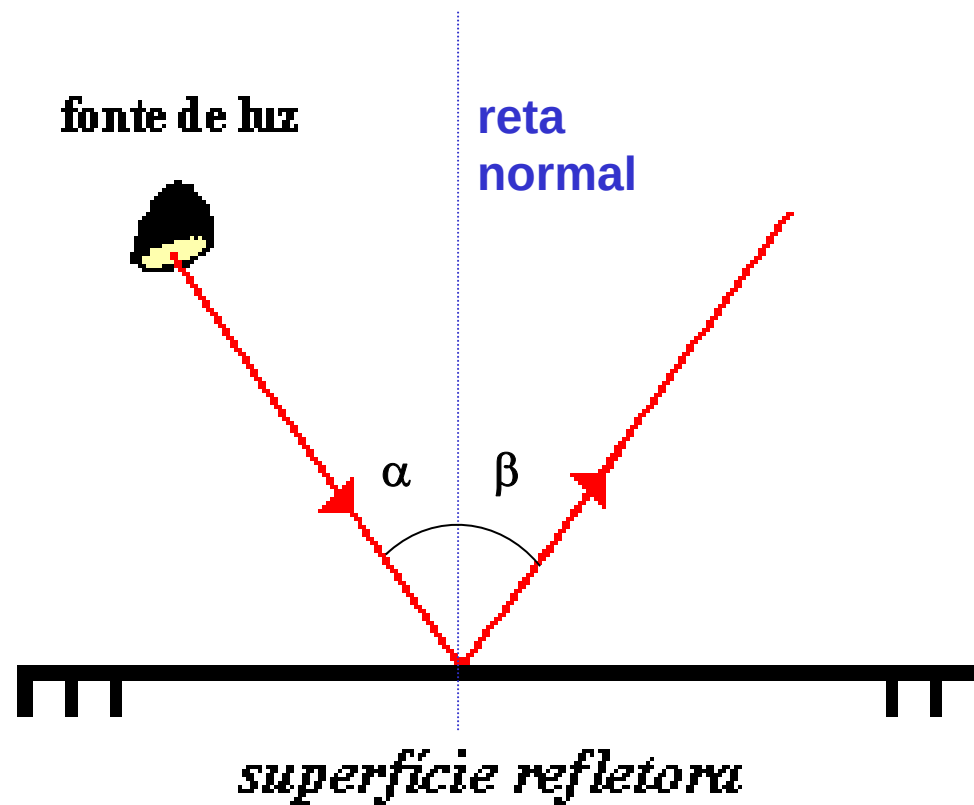
Ok, raio de luz escolhido !!!

Agora não precisamos mais do
pincel de luz. Clique novamente.

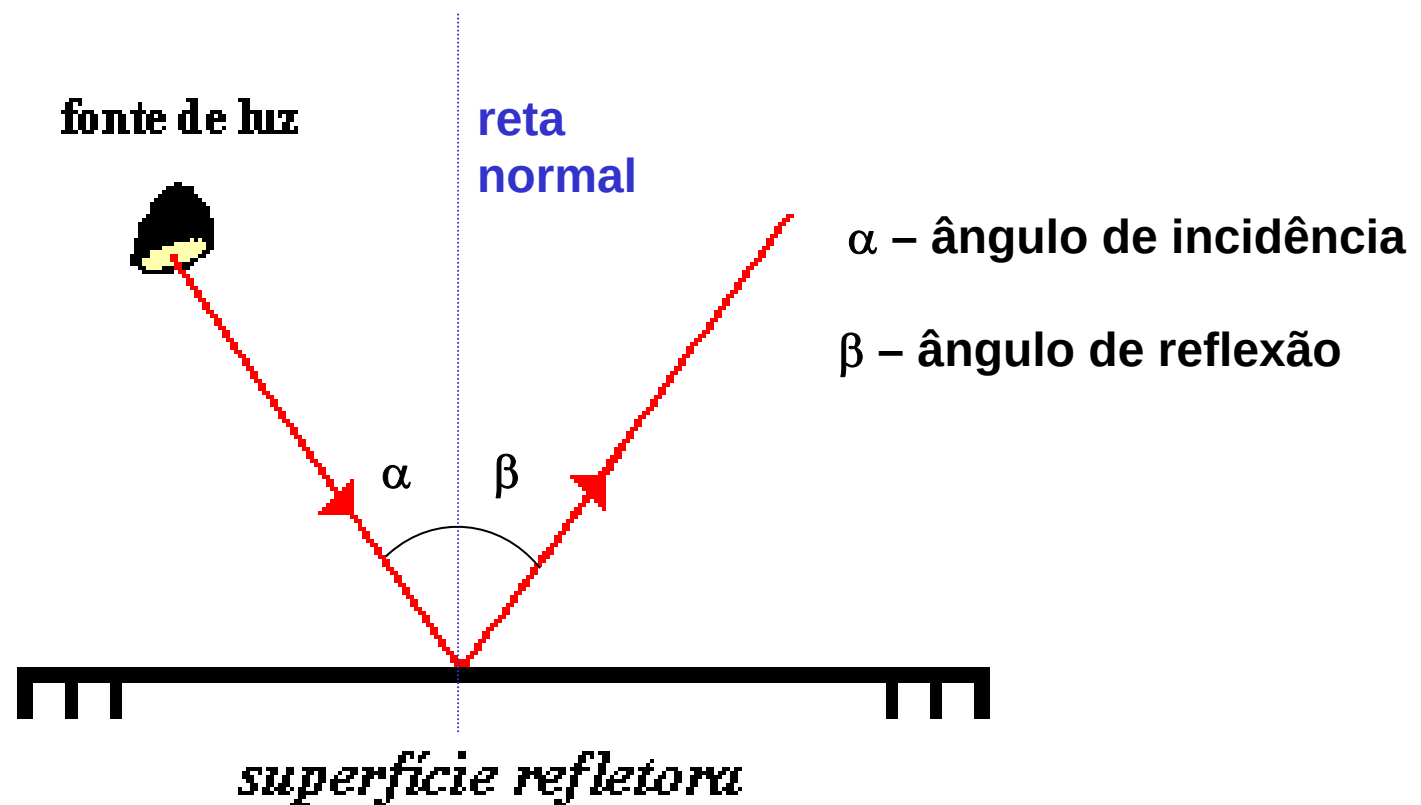


Tudo o que estudarmos para este raio
poderá ser usado para qualquer outro

Agora vamos colocar uma reta formando um ângulo de 90° com a superfície refletora, no ponto onde a luz encontra-se com ela.



A 1ª Lei da Reflexão diz que o ângulo α tem que ser igual ao ângulo β



Princípio de Huygens

Christiaan Huygens (1629-1695), físico holandês, apresentou a primeira teoria ondulatória da luz em 1678.

Teoria mais simples que a Teoria de Maxwell, permite a explicação das leis de reflexão e refração em termos de ondas e define índice de refração.

Construtor de telescópios, em 1655 detectou a primeira lua de Saturno.

Criador do primeiro relógio de pêndulo, patenteado em 1656 seguindo proposta de Galileu.

<http://id.mind.net/~zona/mstm/physics/waves/propagation/huygens3.html>

<http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>

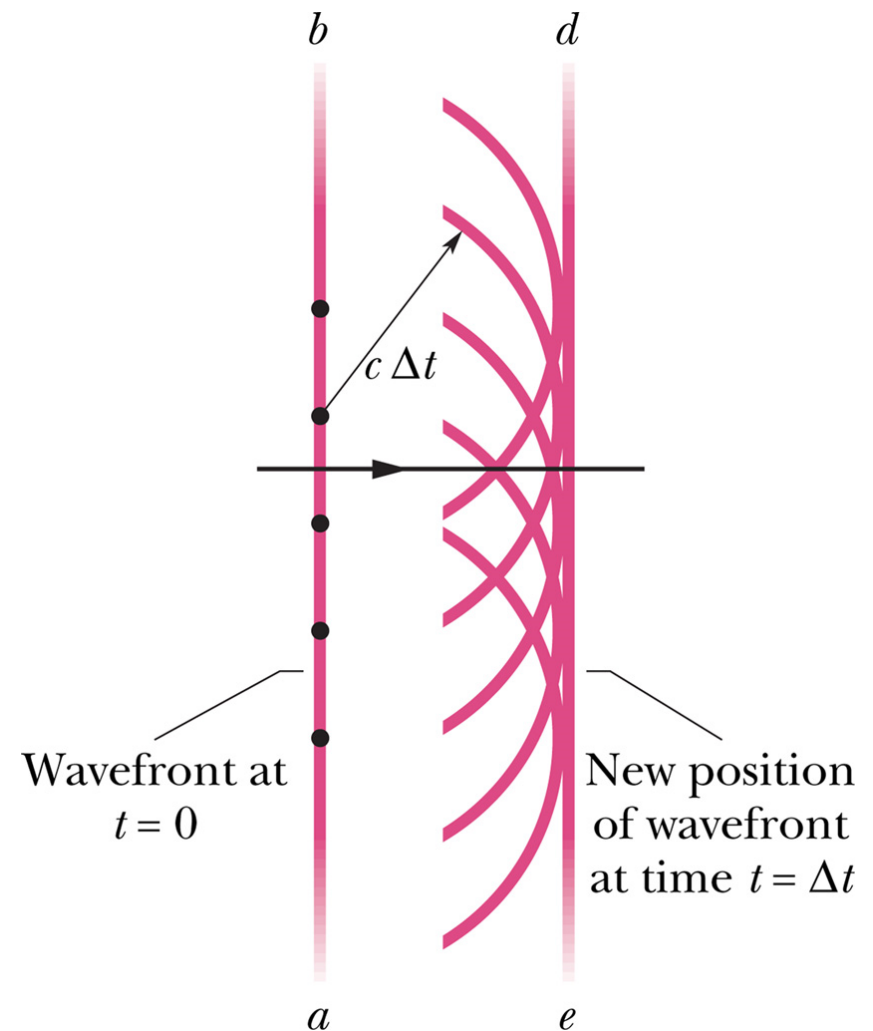
Interferência



Teoria ondulatória de Huygens: utiliza uma construção geométrica que permite prever onde estará uma dada frente de onda em qualquer instante futuro se conhecermos sua posição atual. Essa construção se baseia no Princípio de Huygens.

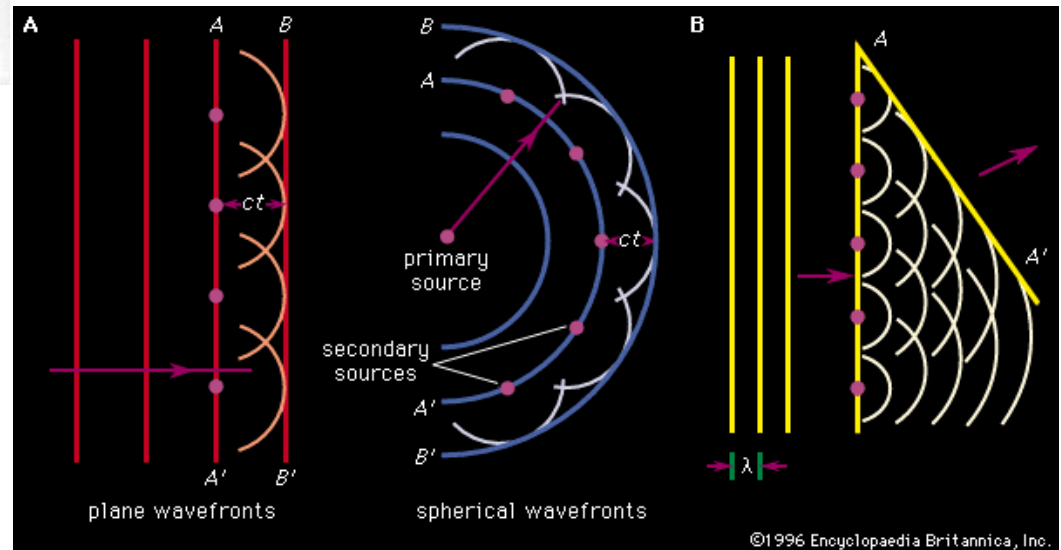
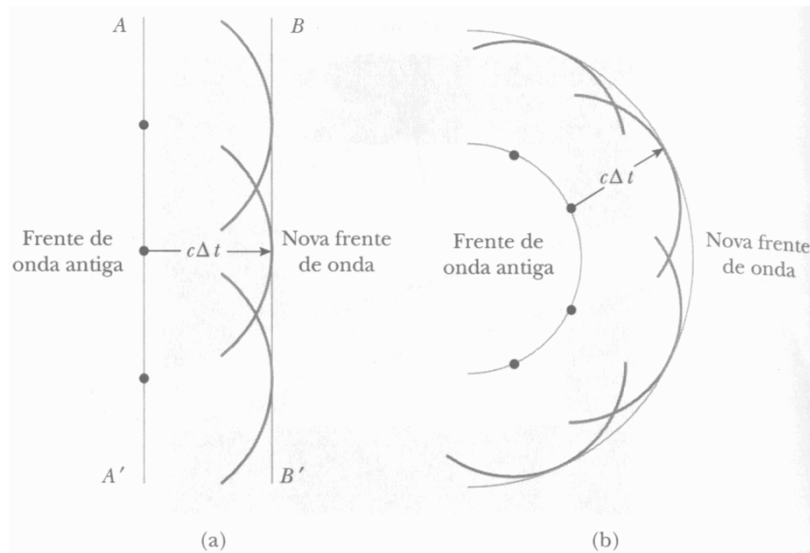
Princípio de Huygens: Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo Δt a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.

A Teoria ondulatória da Luz foi feita pelo físico holandês Christian Huygens em 1678. Embora muito menos completa que a teoria eletromagnética de Maxwell, formulada mais tarde, a teoria de Huygens era matematicamente mais simples e permanece útil até hoje.



Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração: Princípio de Huygens

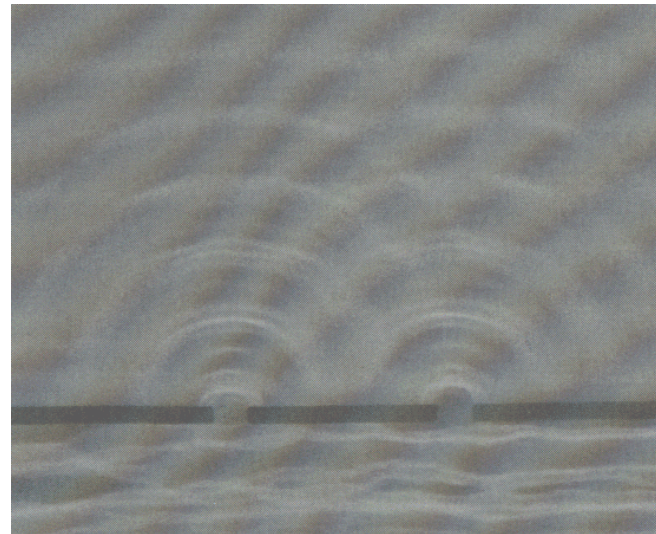
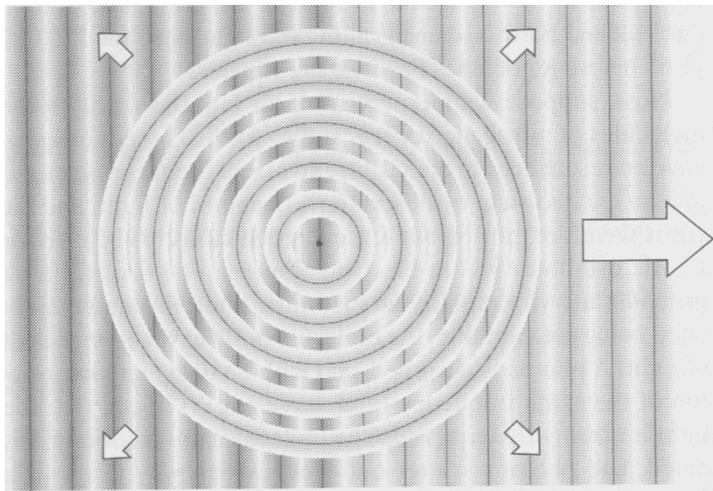


Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração: Princípio de Huygens

Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como **fontes pontuais** para ondas secundárias.

Depois de um intervalo de tempo t , a nova posição da frente onda é dada por uma superfície tangente a estas ondas secundárias.



Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração

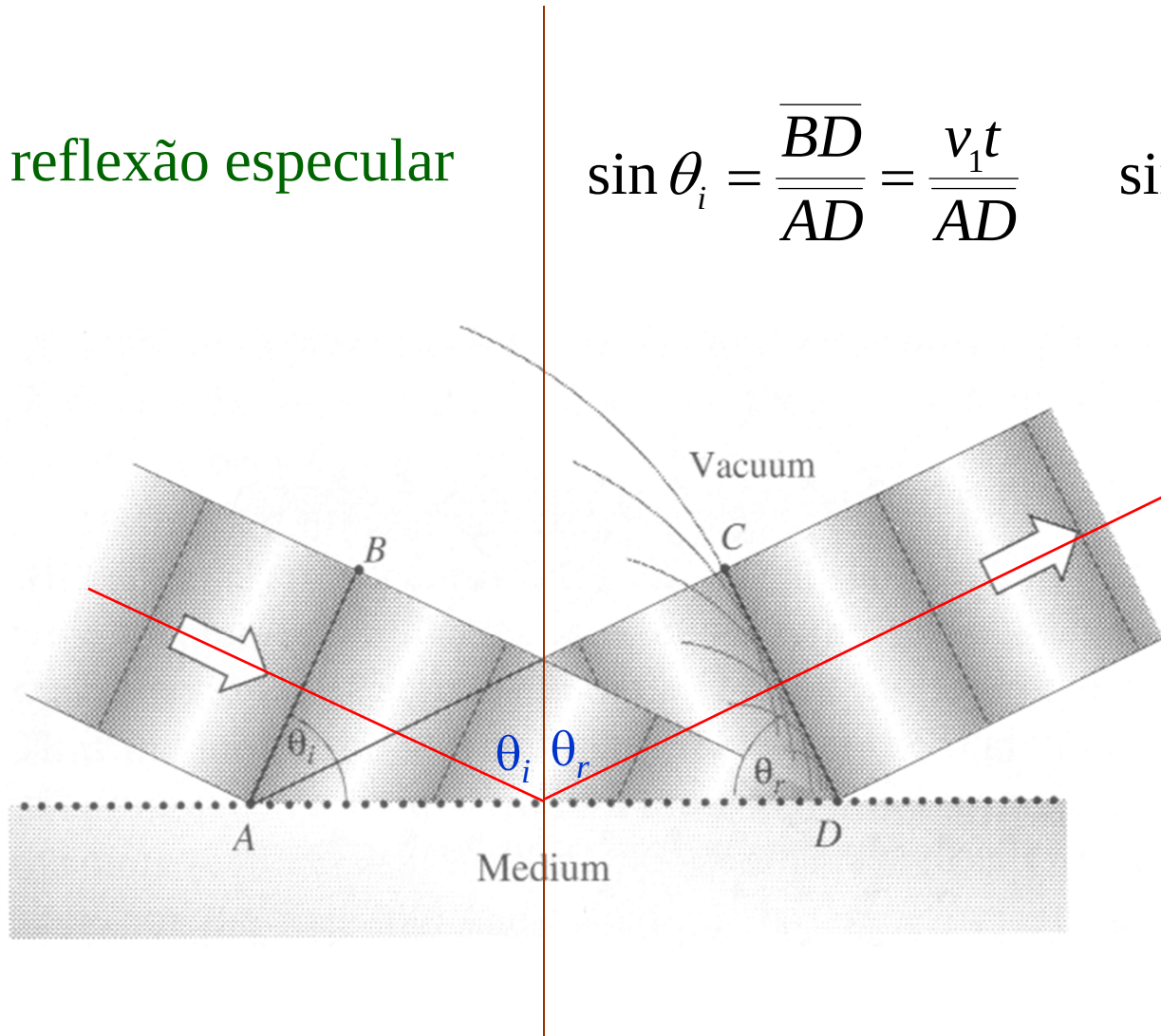
reflexão especular

$$\sin \theta_i = \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}} = \frac{v_1 t}{\overline{AD}}$$

$$\sin \theta_r = \frac{\overline{AC}}{\overline{AD}} = \frac{v_1 t}{\overline{AD}}$$

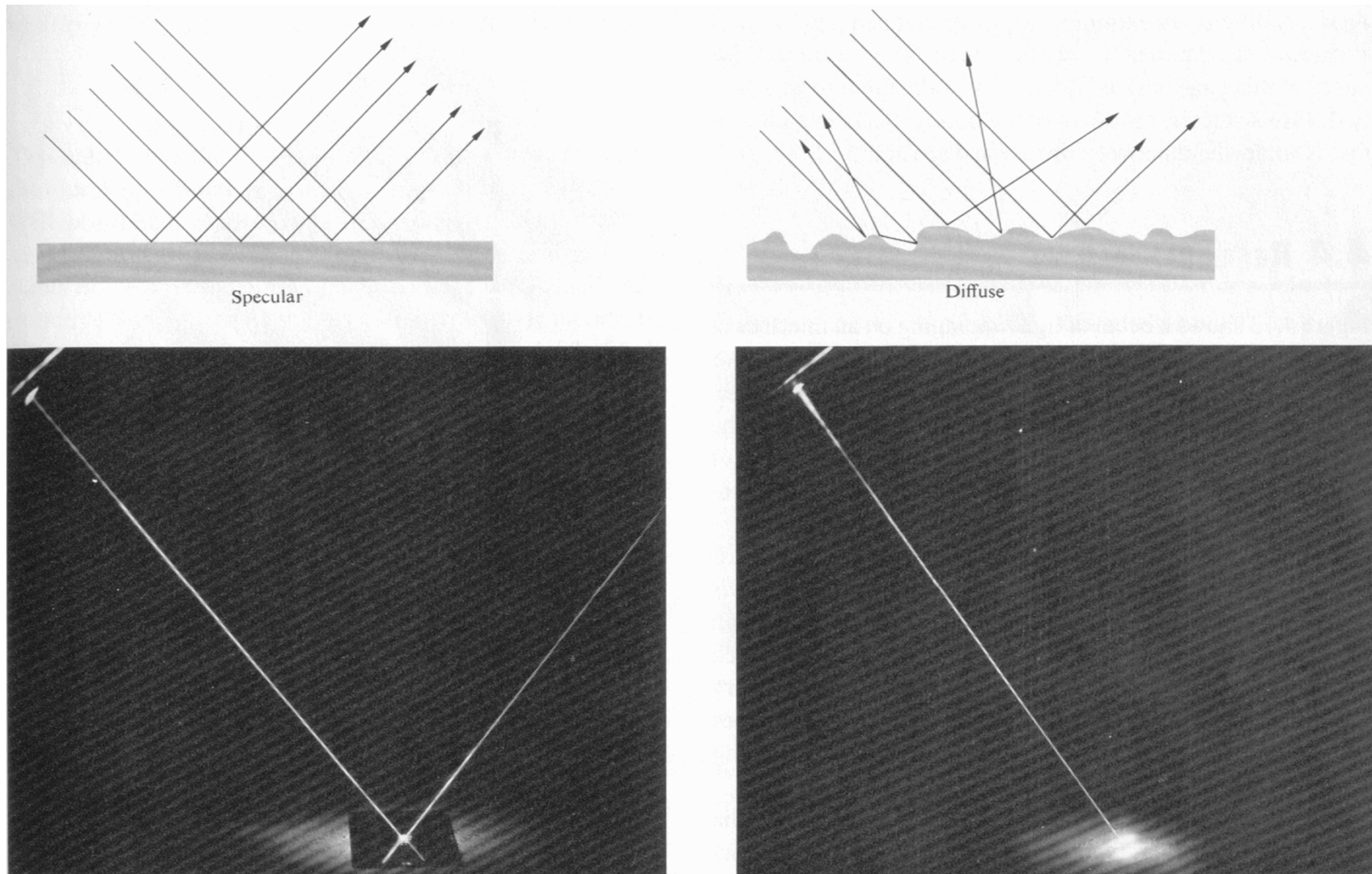


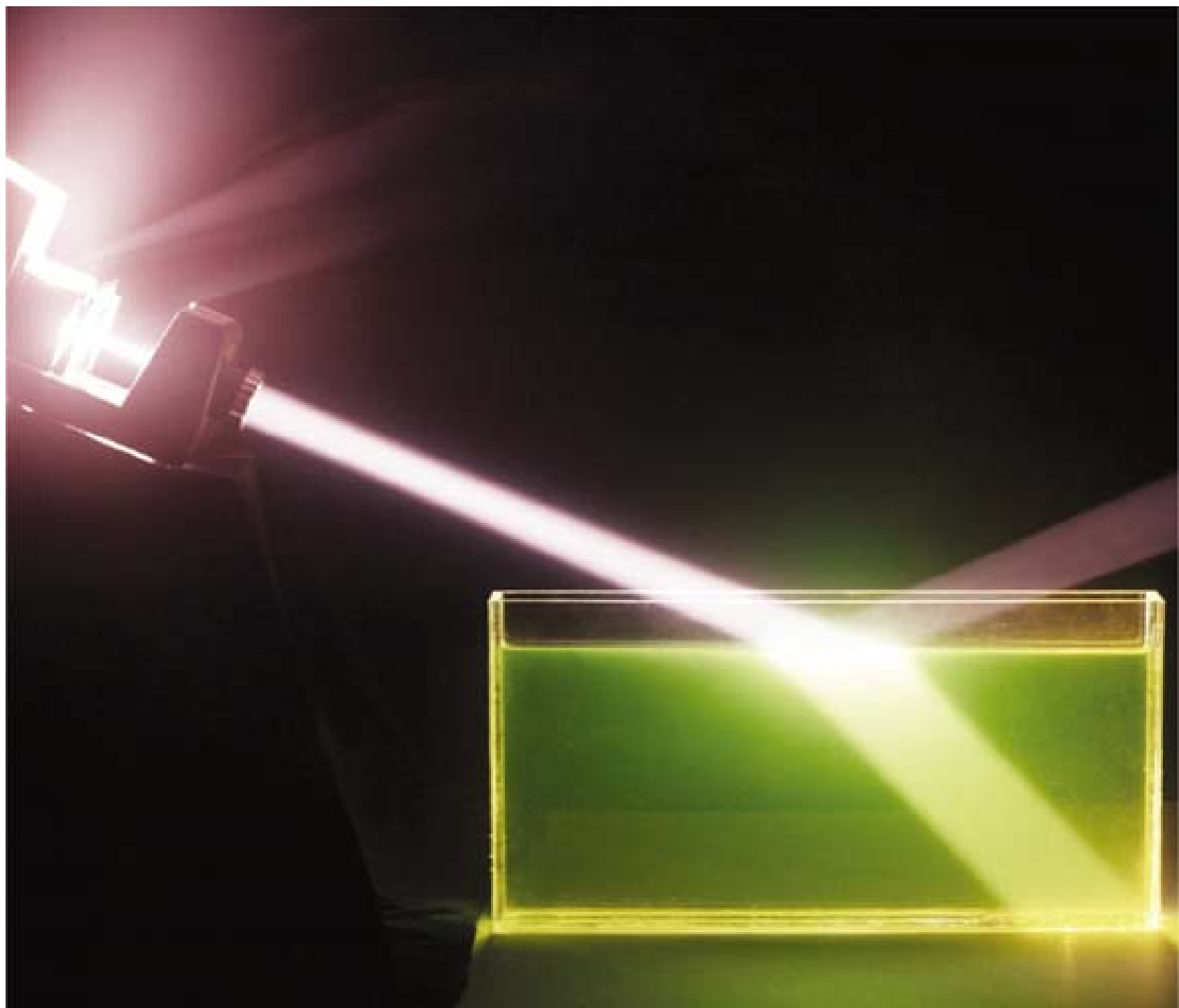
$$\theta_i = \theta_r$$



Ondas eletromagnéticas

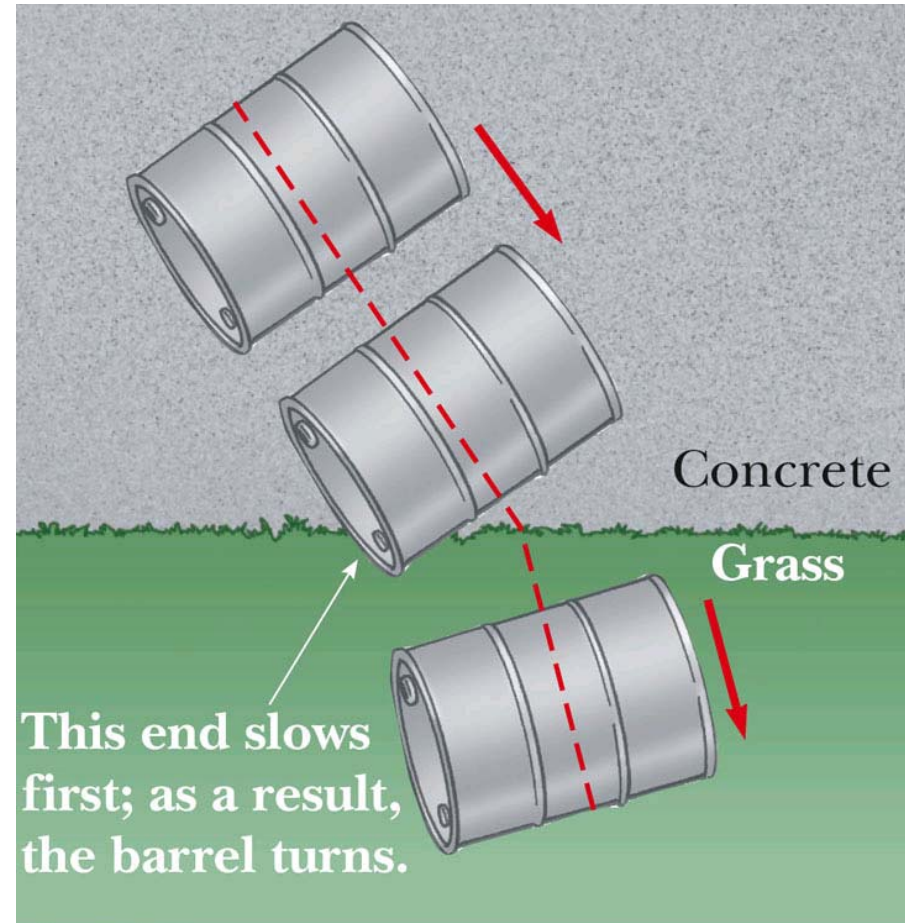
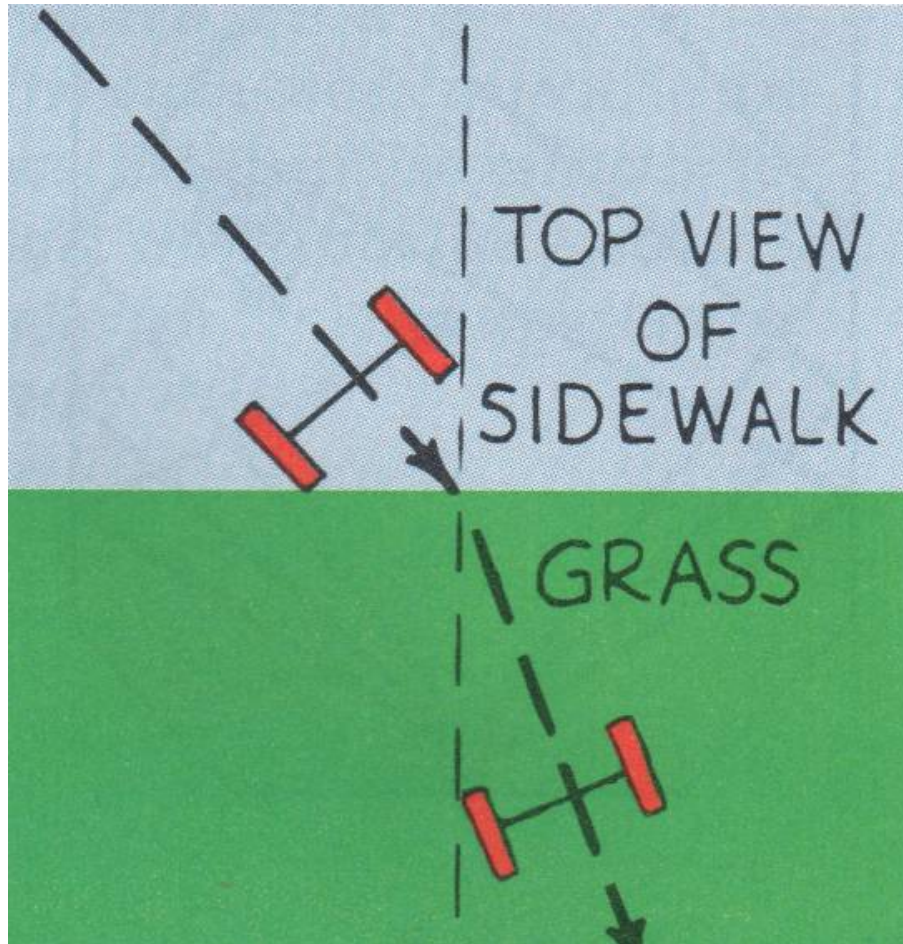
Reflexão e refração: reflexão especular x reflexão difusa



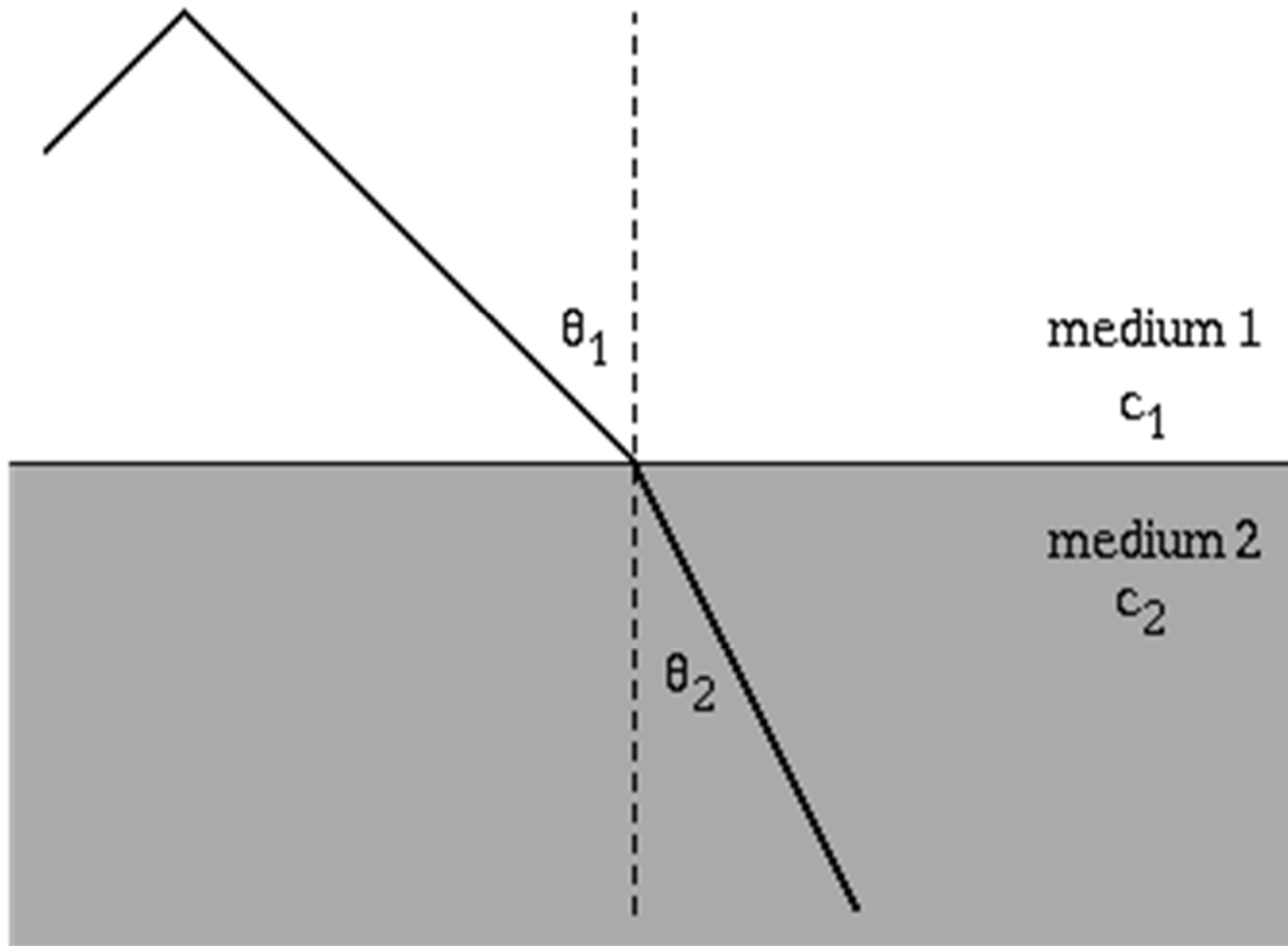


Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração



Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

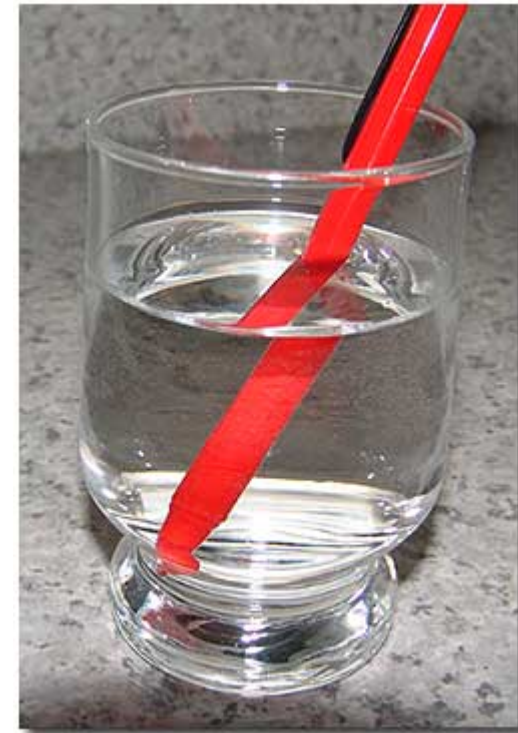
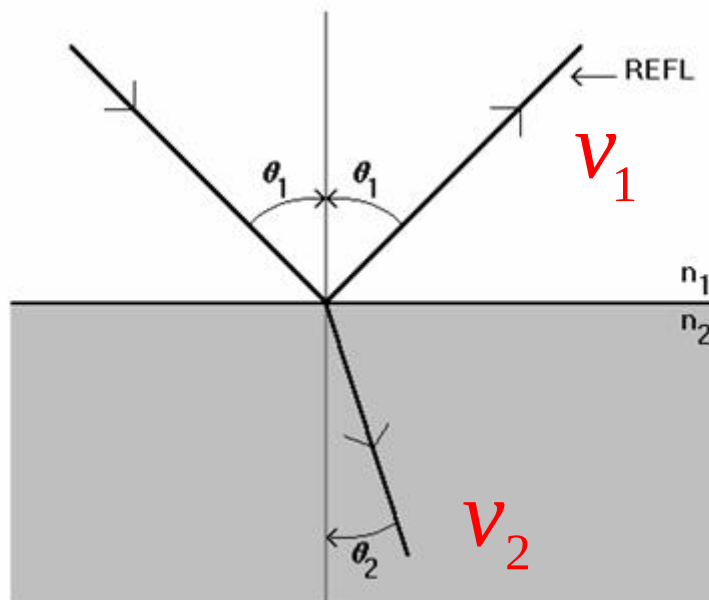


Ondas eletromagnéticas

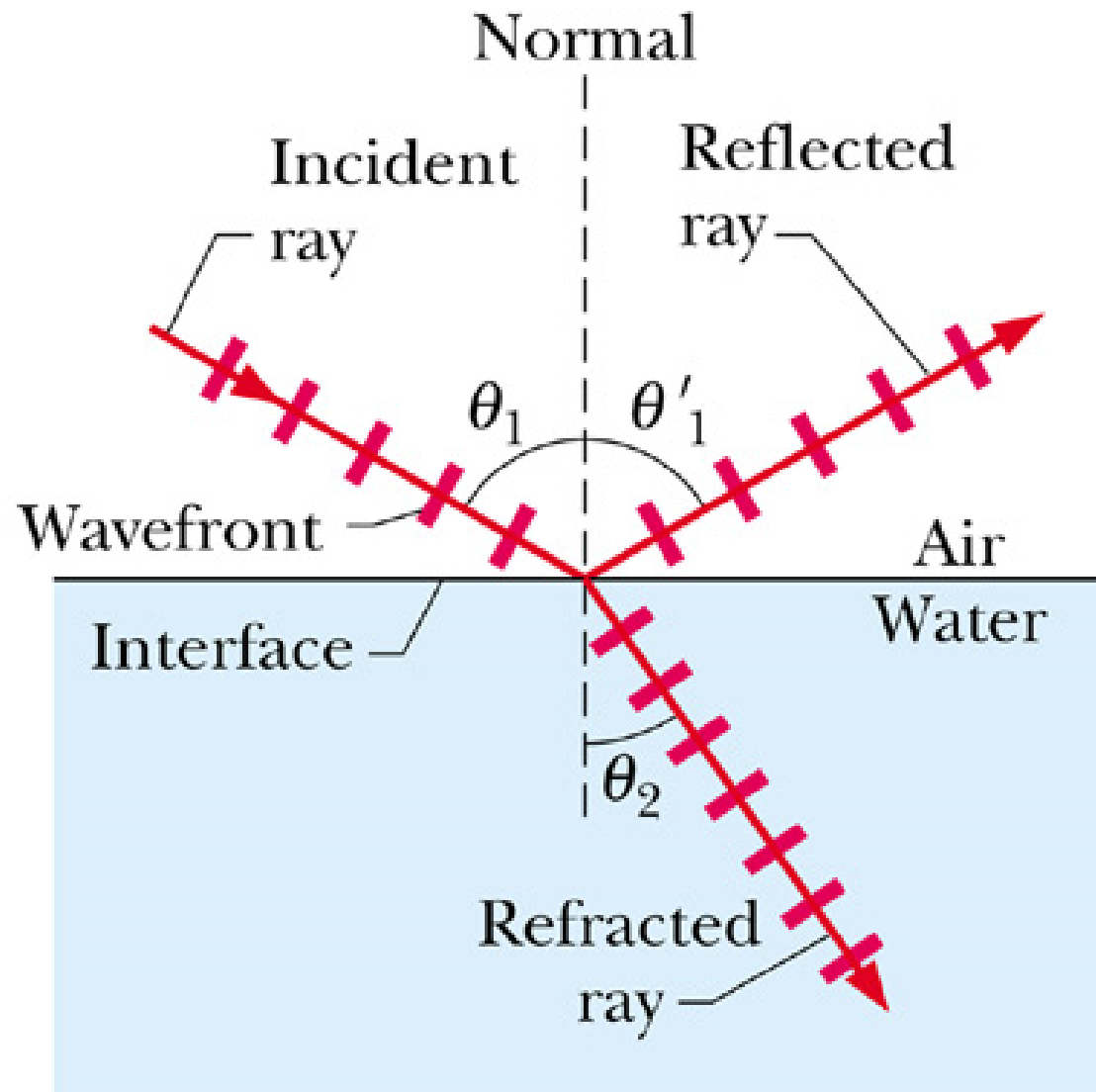
Reflexão e refração

Índice de refração

$$n \equiv \frac{c}{v}$$



<http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/viewtopic.php?t=32>



Lei da Reflexão:

Reflexão: $\theta'_1 = \theta_1$

Lei de Snell:

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

Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração: Lei de Snell

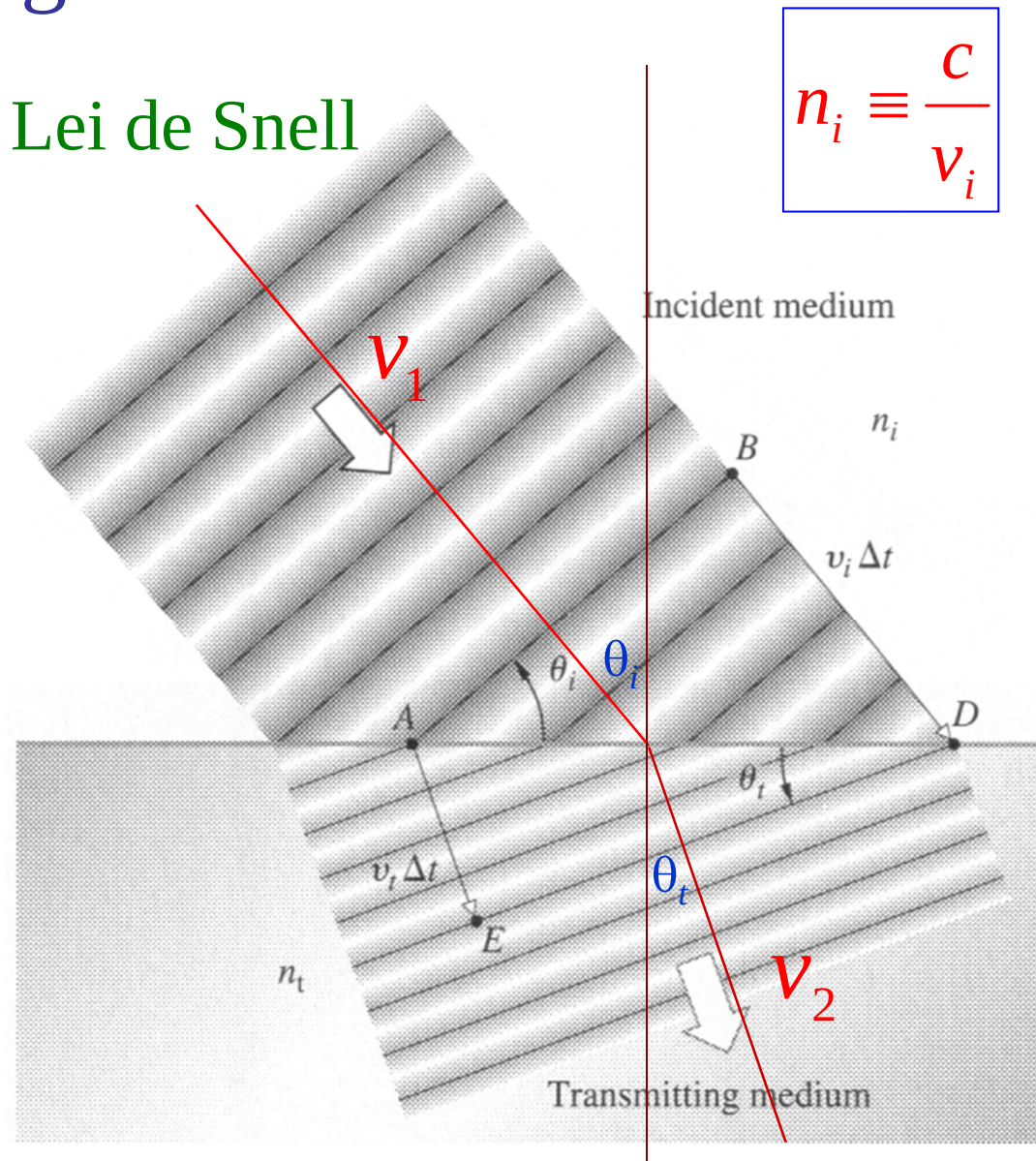
$$\text{sen } \theta_i = \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}} = \frac{v_i t}{AD}$$

$$\text{sen } \theta_t = \frac{\overline{AE}}{\overline{AD}} = \frac{v_t t}{\overline{AD}}$$



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

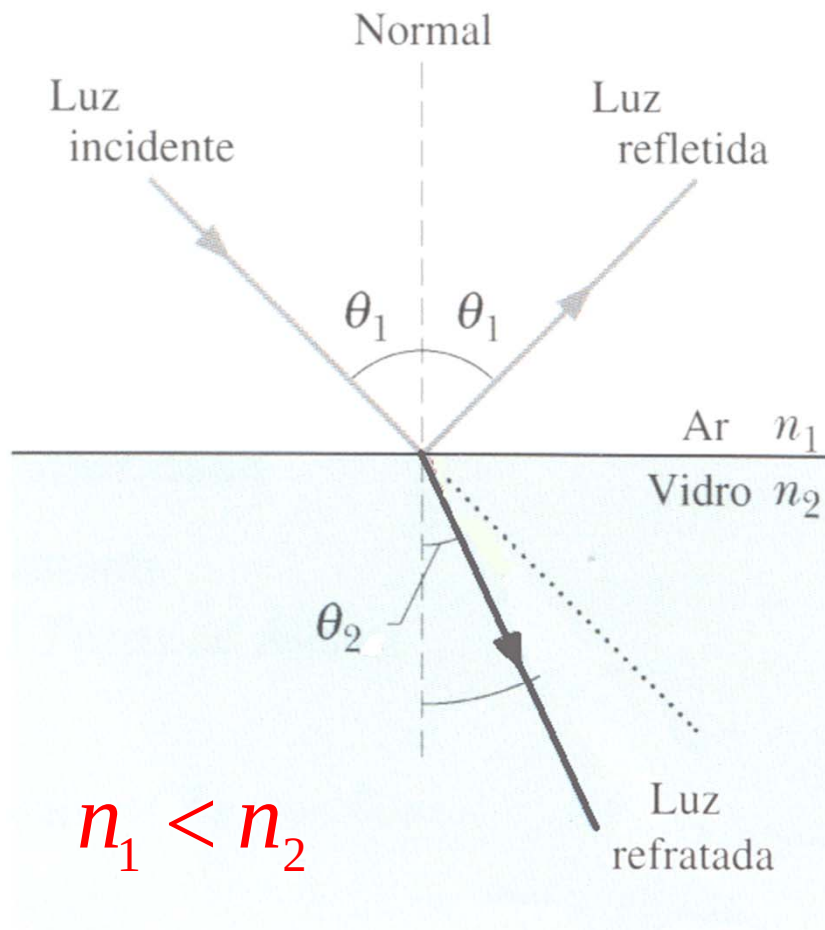
onde $\theta_1 = \theta_i$
 $\theta_2 = \theta_t$



Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração: Lei de Snell

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1$$

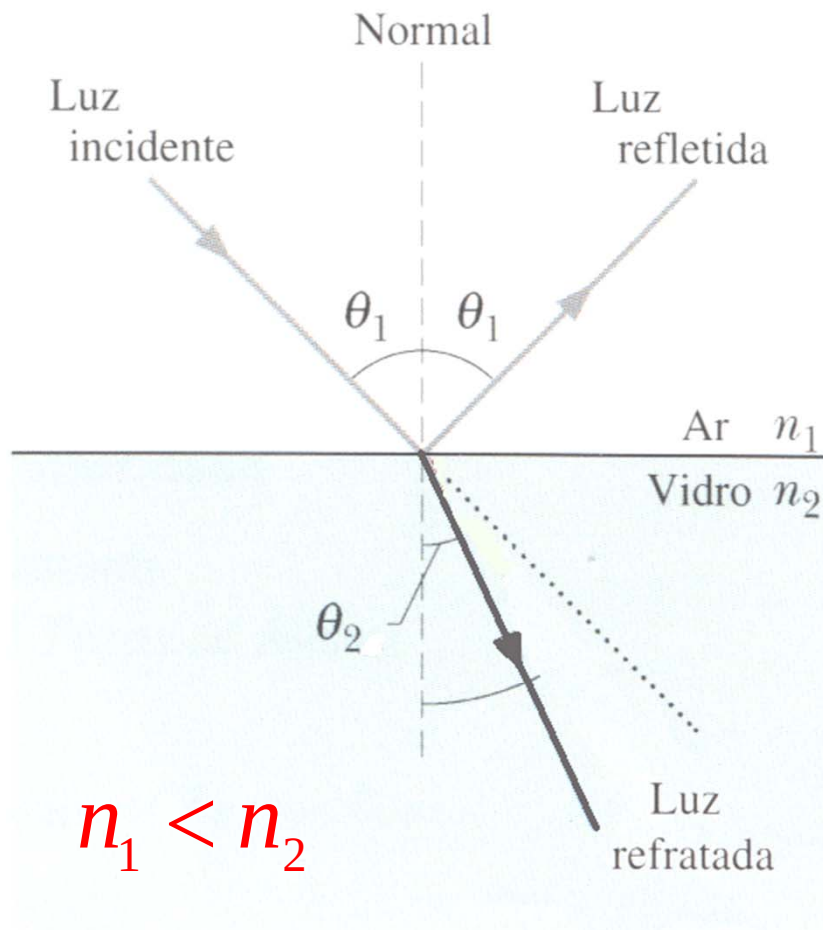


(a)

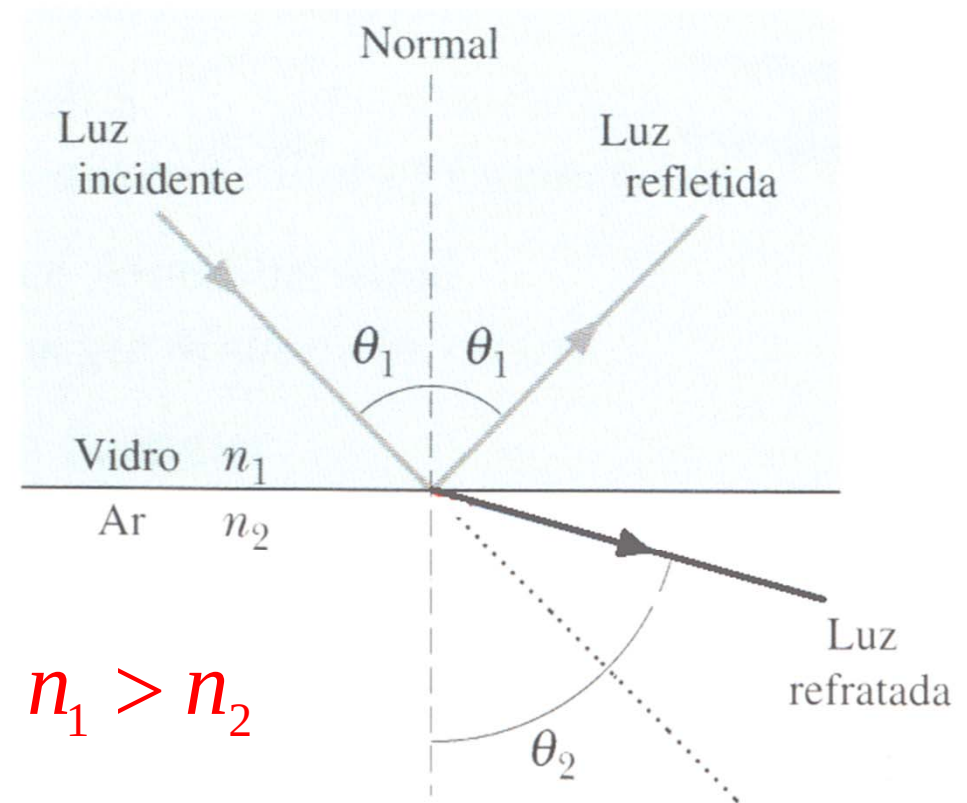
Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração: Lei de Snell

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1$$



(a)



(b)

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração

TABLE 33-1

Some Indexes of Refraction^a

Medium	Index	Medium	Index
Vacuum	Exactly 1	Typical crown glass	1.52
Air (STP) ^b	1.00029	Sodium chloride	1.54
Water (20°C)	1.33	Polystyrene	1.55
Acetone	1.36	Carbon disulfide	1.63
Ethyl alcohol	1.36	Heavy flint glass	1.65
Sugar solution (30%)	1.38	Sapphire	1.77
Fused quartz	1.46	Heaviest flint glass	1.89
Sugar solution (80%)	1.49	Diamond	2.42

^aFor a wavelength of 589 nm (yellow sodium light).

^bSTP means “standard temperature (0°C) and pressure (1 atm).”

Dispersão
Cromática:

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração

❖ Dispersão Cromática:

O índice de refração da luz, em qualquer meio, exceto no vácuo, depende do comprimento de onda da luz. Uma vez definido o índice n , a luz de diferentes comprimentos de onda tem velocidades diferentes num certo meio.

Além disso, ondas luminosas de comprimentos de onda diferentes são refratadas com ângulos diferentes ao atravessarem uma superfície.

Assim, quando um feixe de luz, consistindo em componentes com diferentes comprimentos de onda, incide numa superfície de separação de dois meios, os componentes do feixe são separados por refração e se propagam em direções diferentes.

Esse efeito é chamado de dispersão cromática, onde “dispersão” significa a separação dos comprimentos de onda, ou cores, e “cromática” significa a associação da cor ao seu comprimento de onda.

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

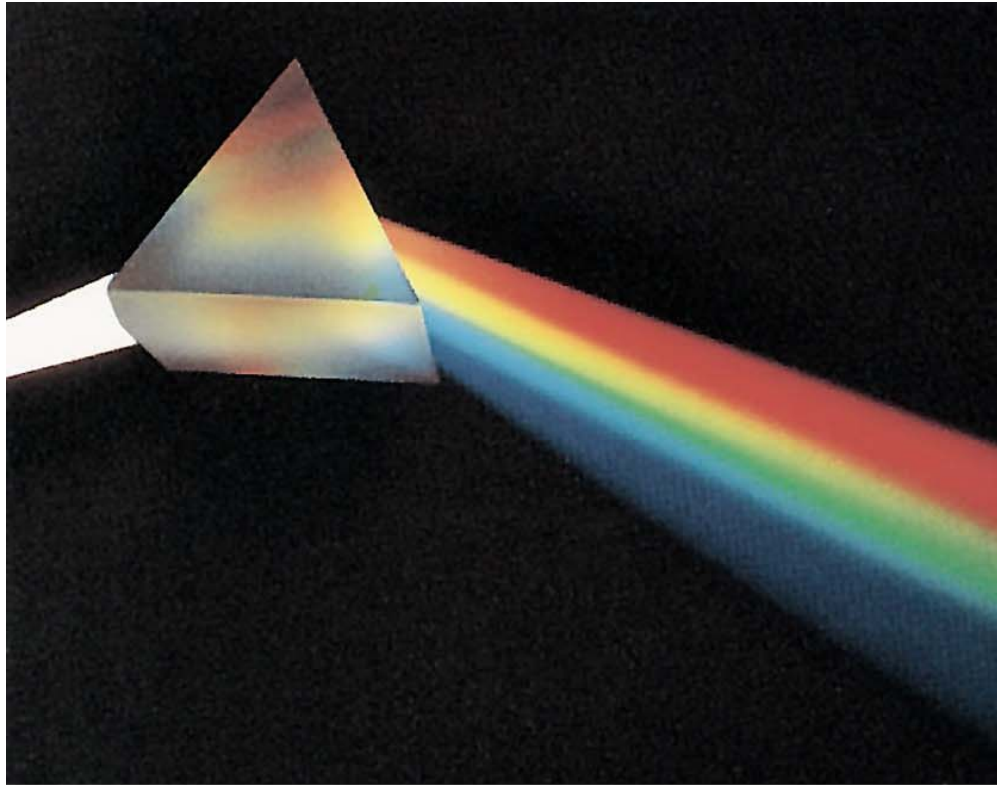
33-8 | Reflexão e Refração

❖ Dispersão Cromática:

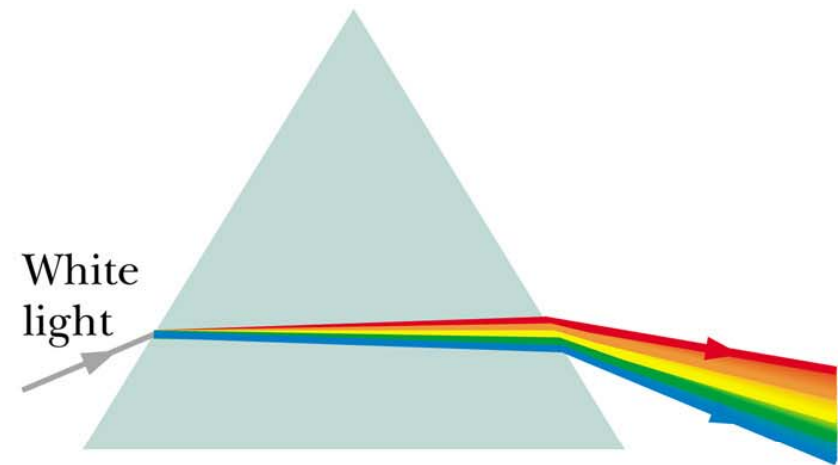
Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração

❖ Dispersão Cromática:



(a)

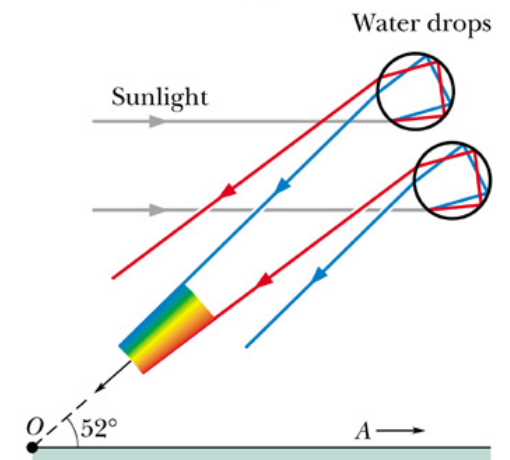
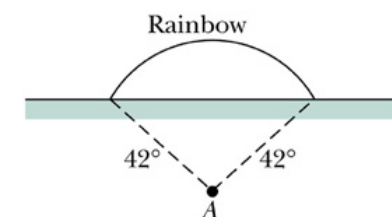
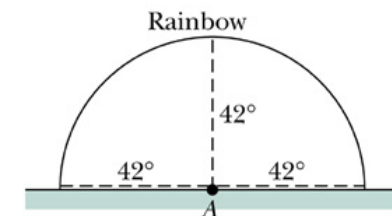
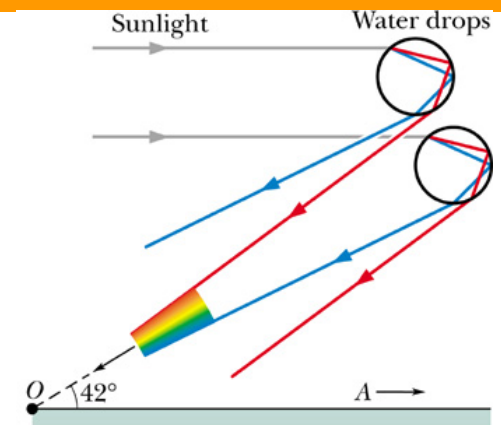


(b)

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração

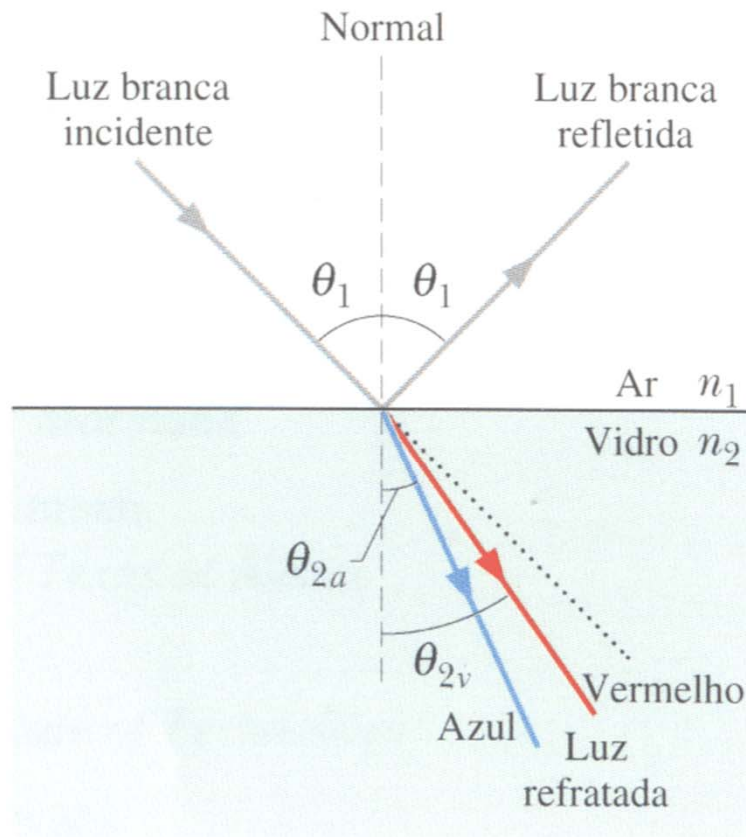
❖ O Arco-íris:



Ondas eletromagnéticas

Dispersão cromática $n = n(\omega)$ $\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_k \vec{E}(k) \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$
Luz branca

Em geral, se $\omega_1 > \omega_2 \Rightarrow n(\omega_1) > n(\omega_2)$

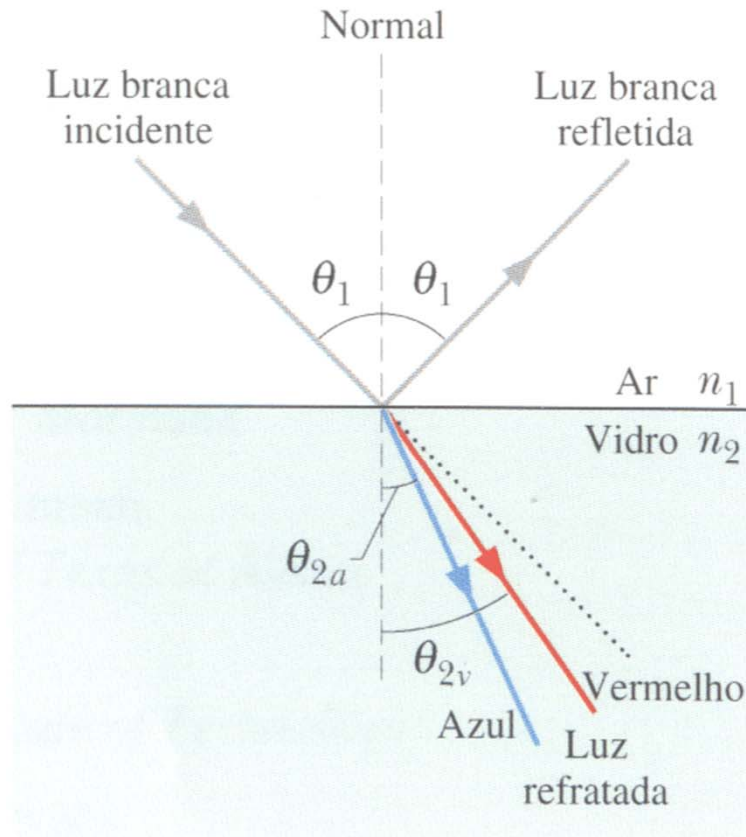


(a)

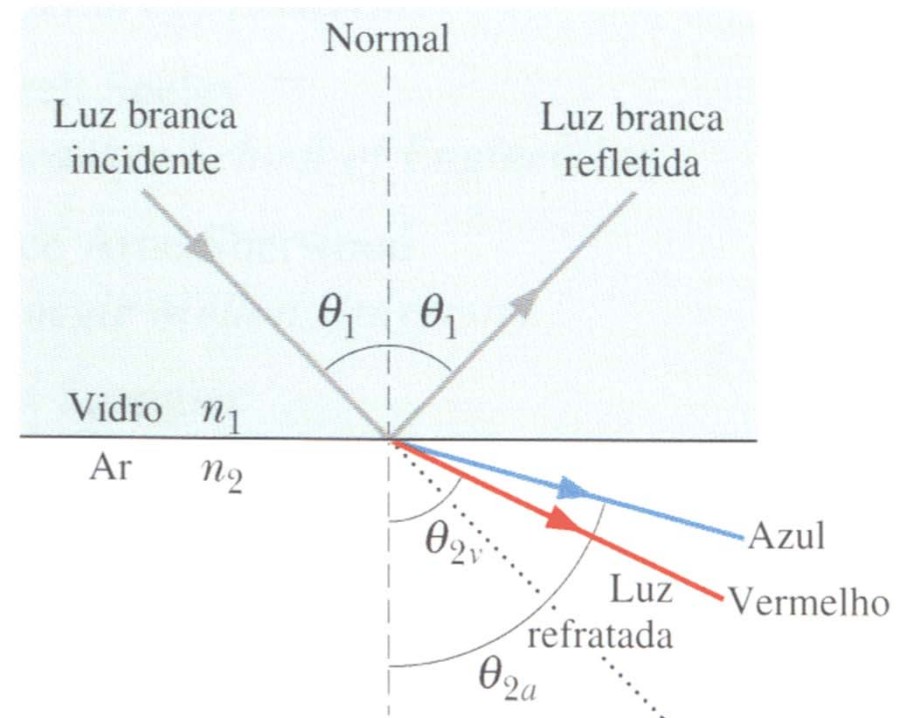
Ondas eletromagnéticas

Dispersão cromática $n = n(\omega)$ $\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_k \vec{E}(k) \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$
Luz branca

Em geral, se $\omega_1 > \omega_2 \Rightarrow n(\omega_1) > n(\omega_2)$



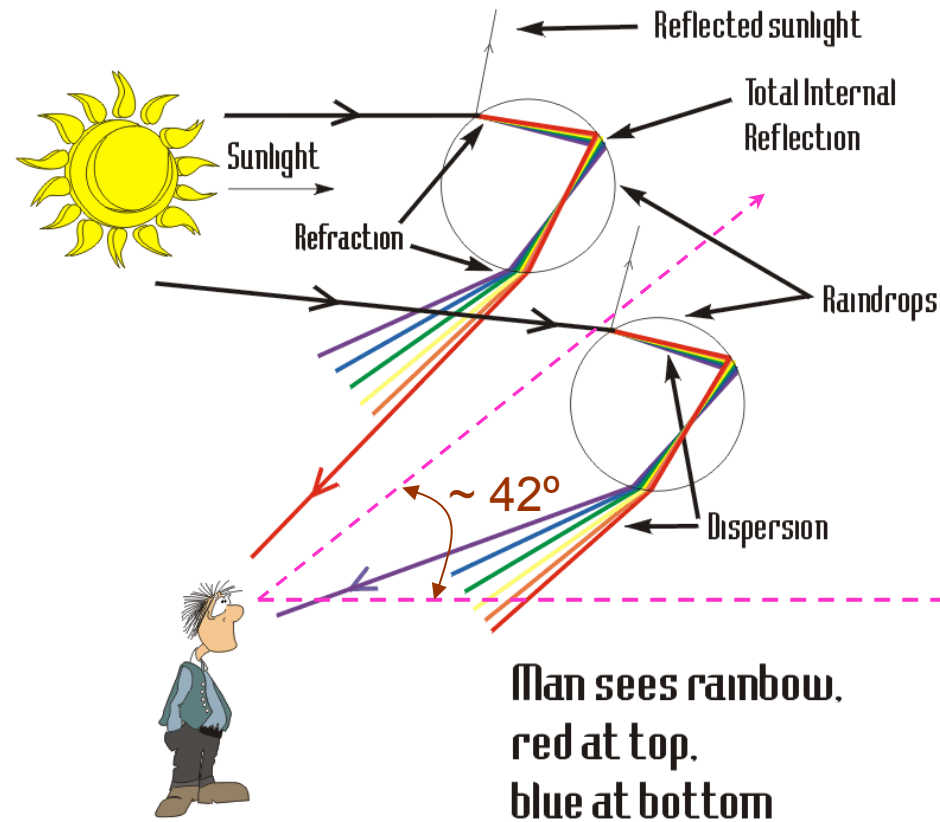
(a)



(b)

Ondas eletromagnéticas

Dispersão cromática: Formação do arco-íris



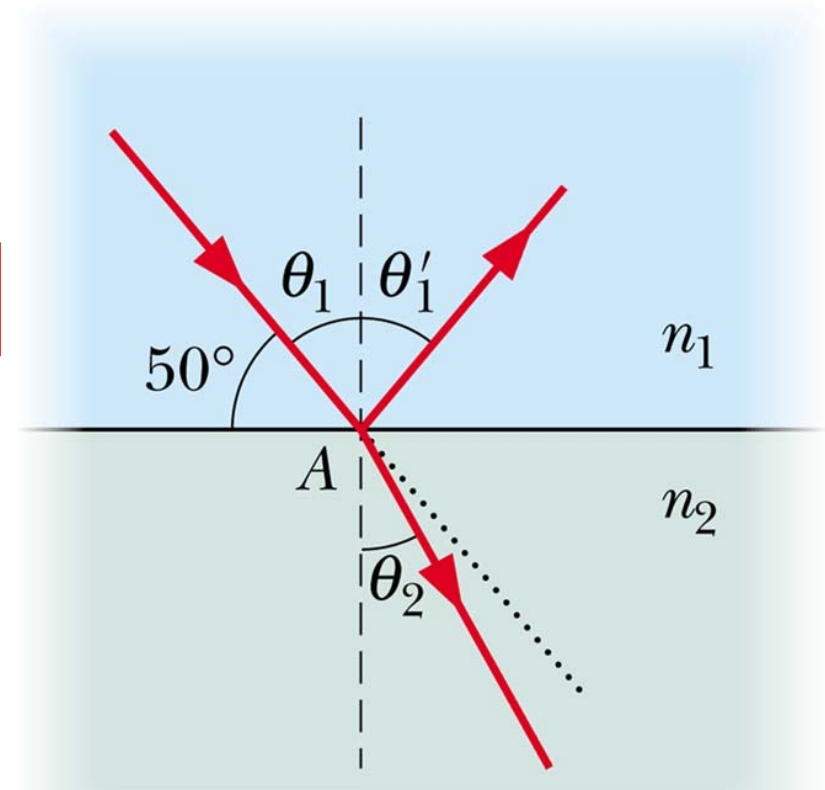
Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

Exemplo 33-3 (pág. 21):

(a) Na Fig. 33-22a um feixe de luz monocromática é refletido e refratado no ponto A da interface entre o material 1, cujo índice de refração é $n_1 = 1,33$, e o material 2, cujo índice de refração é $n_2 = 1,77$. O feixe incidente faz um ângulo de 50° com a interface. Qual é o ângulo de reflexão no ponto A? Qual é o ângulo de refração?

Resposta (a):

$$\theta'_1 = 40^\circ \quad \text{e} \quad \theta_2 = 28,88^\circ$$



Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

Idéias chave:

- 1) O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Os dois ângulos são medidos em relação à normal a superfície.
- 2) Quando a Luz atinge a interface entre os materiais com índices de refração diferentes, parte da luz pode ser refratada na interface de acordo com a Lei de Snell.

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

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

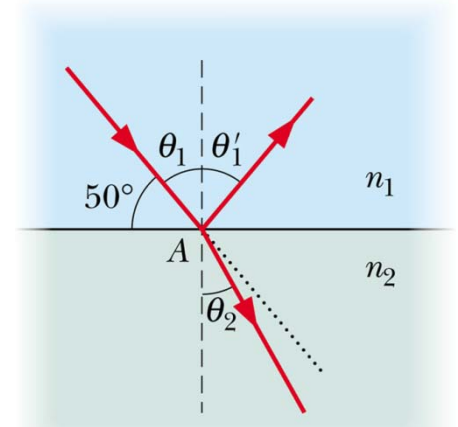
Cálculos:

$$\theta_1 = \theta'_1 = 40^\circ$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \text{sen} 40^\circ \right)$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1,33}{1,77} \cdot 0,643 \right)$$

$$\theta_2 = 28,88^\circ \approx 29^\circ$$

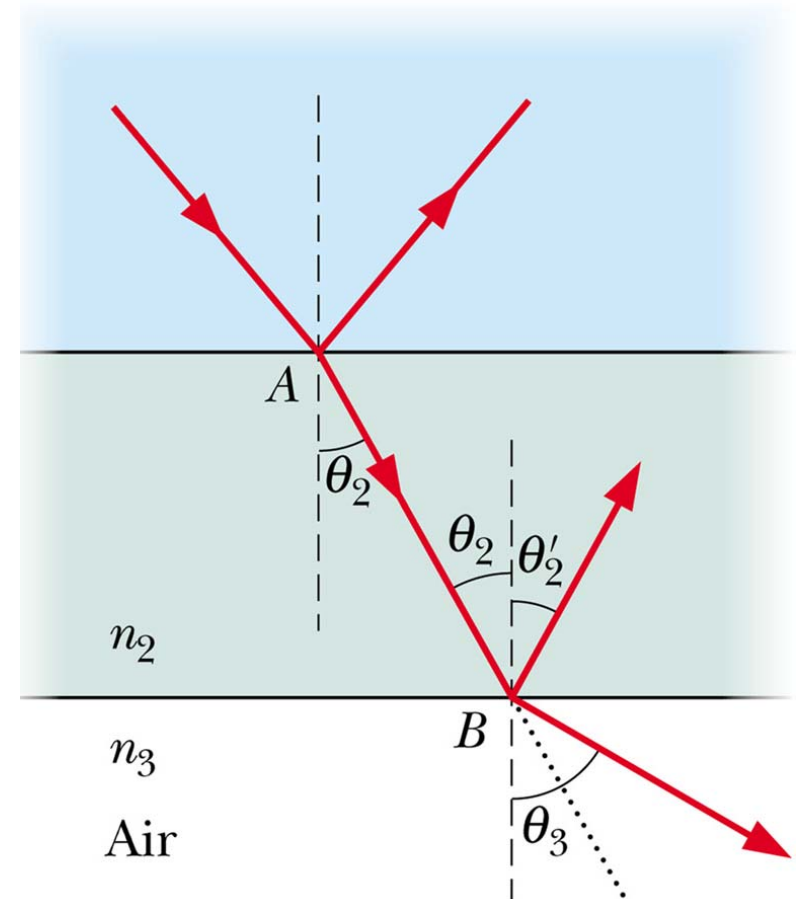


Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

(b) A luz que penetrou no material 2 no ponto A chega ao ponto B da interface do material 2 com o material 3, que é o ar, como mostra a Fig. 33-22b. A interface do material 2 com o material 3 é paralela à interface do material 1 com o material 2. No ponto B, parte da luz é refletida e parte é refratada. Qual é o ângulo de reflexão? Qual é o ângulo de refração?

Resposta (b):

$$\theta_2' = 28,88^\circ \quad \text{e} \quad \theta_3 = 58,75^\circ$$



Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

Cálculos:

Sabemos (pelo item anterior) que o ângulo θ_2 (ângulo de refração) do meio 1 para o meio 2 é de $28,88^\circ$, que também é o ângulo de incidência do raio de luz do meio 2 para o meio 3, portanto, o ângulo de reflexão da luz na interface do meio 2 e 3 também é $28,88^\circ$.

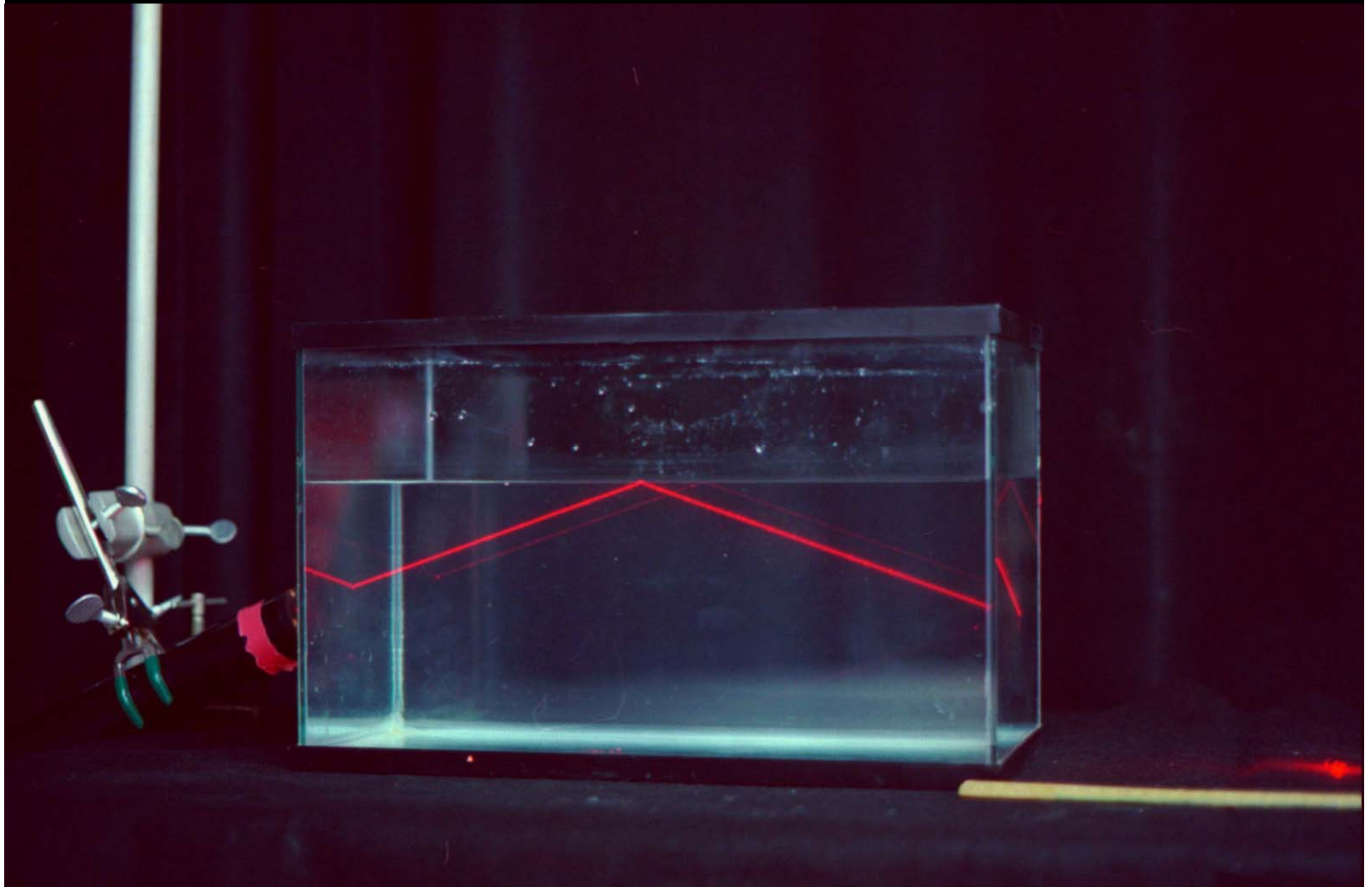
$$n_3 \sin \theta_3 = n_2 \sin \theta_2$$

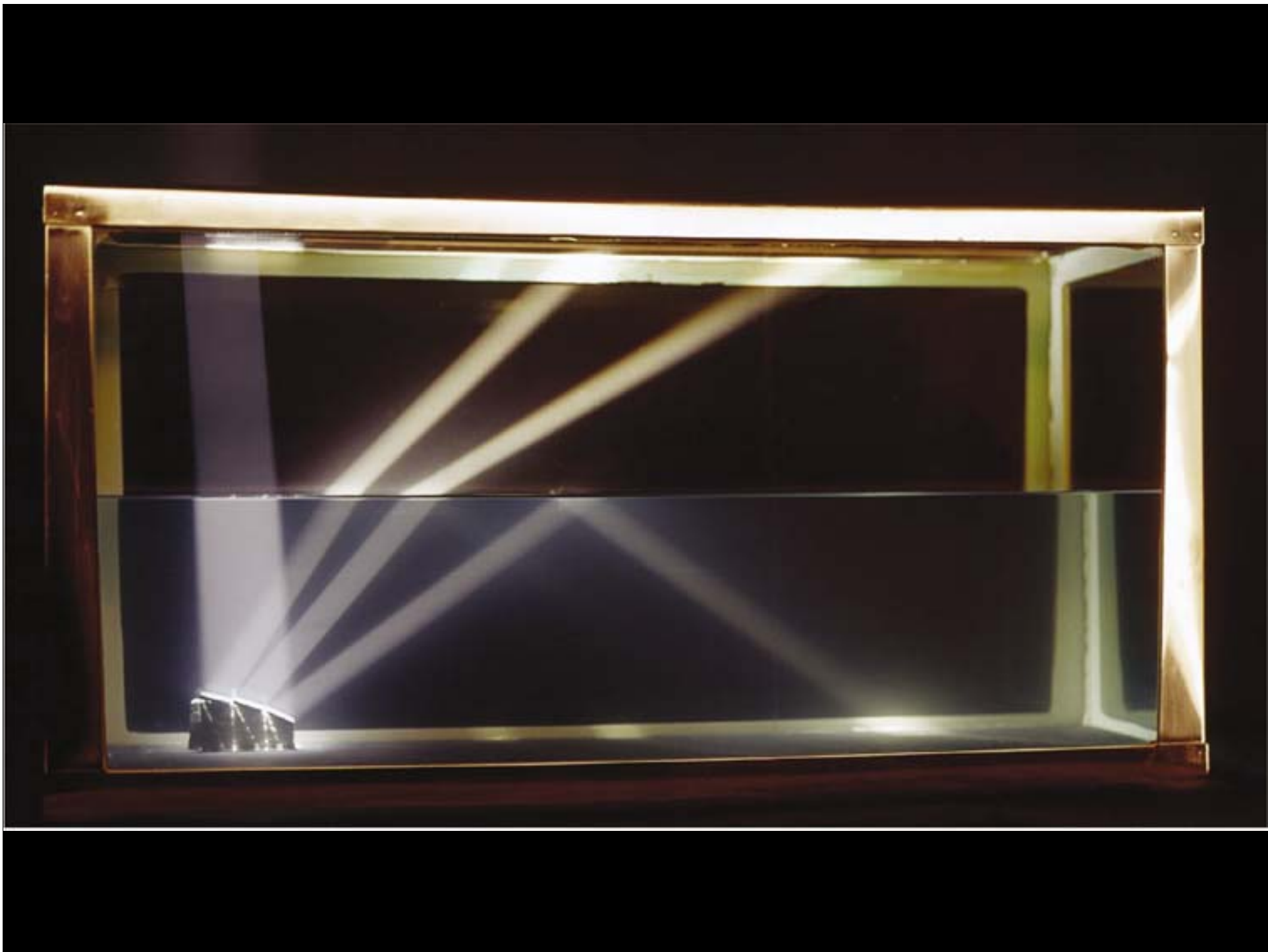
$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_3} \sin 28,88^\circ \right)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{1,77}{1,00} \cdot 0,483 \right)$$

$$\theta_3 = 58,75^\circ \approx 59^\circ$$

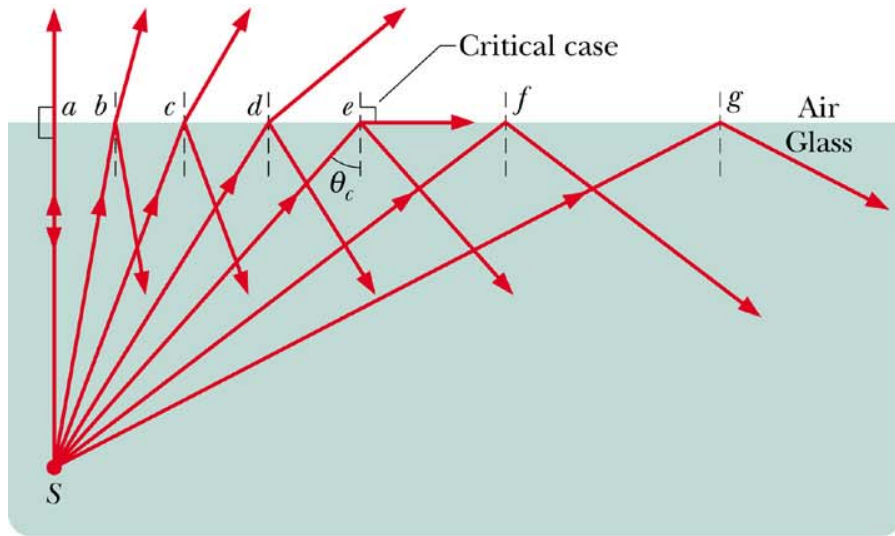
Reflexão Interna Total



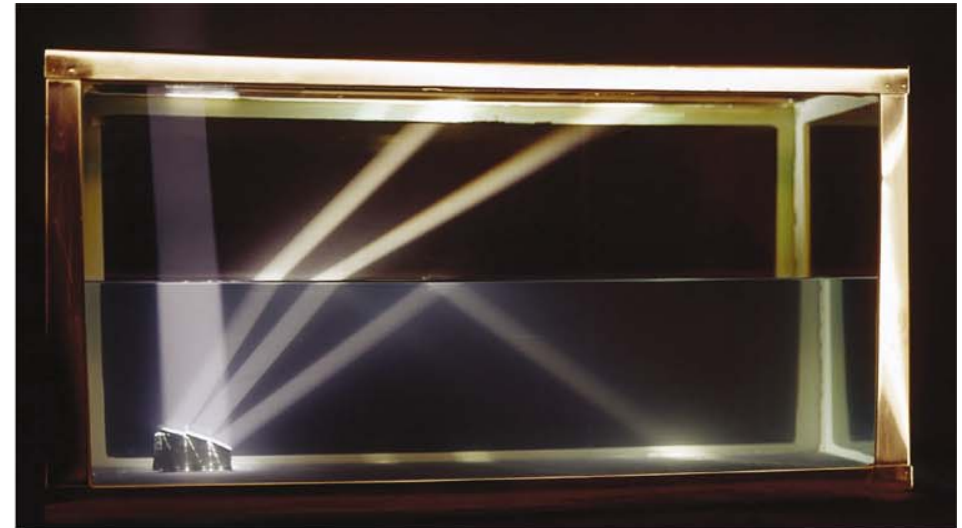


Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-9 | Reflexão Interna Total



(a)



(b)

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

Se $n_1 > n_2$ o raio refratado se afastará da normal podendo acontecer a reflexão total.

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \therefore \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \therefore$$

$$\text{Ângulo Crítico: } \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

Ondas eletromagnéticas

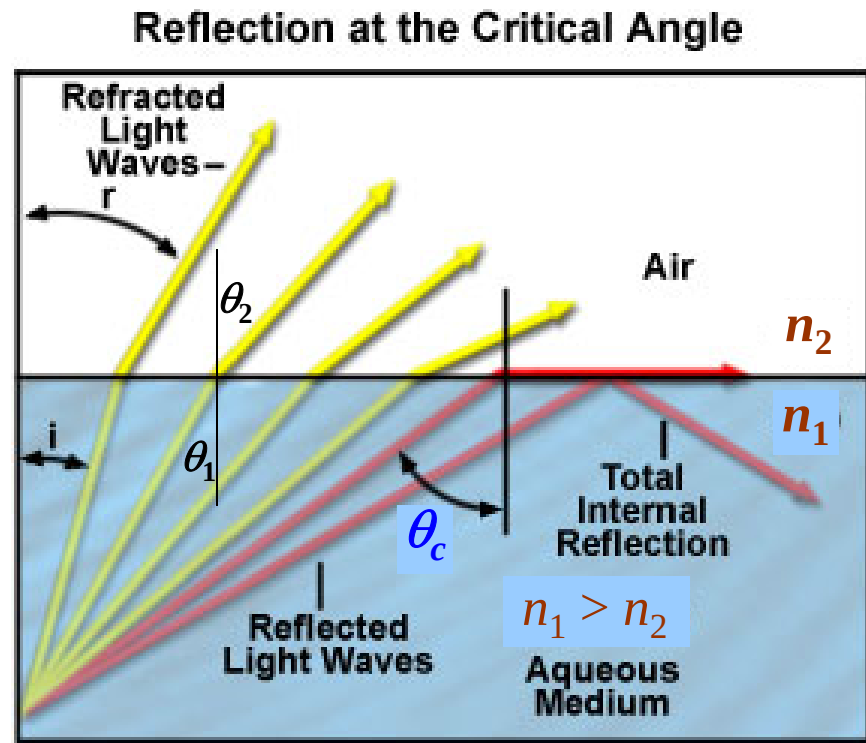
Reflexão interna total

Se a incidência se dá de um meio mais refringente para outro menos refringente, ou seja, $n_1 > n_2$, há um ângulo crítico acima do qual só há reflexão.

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

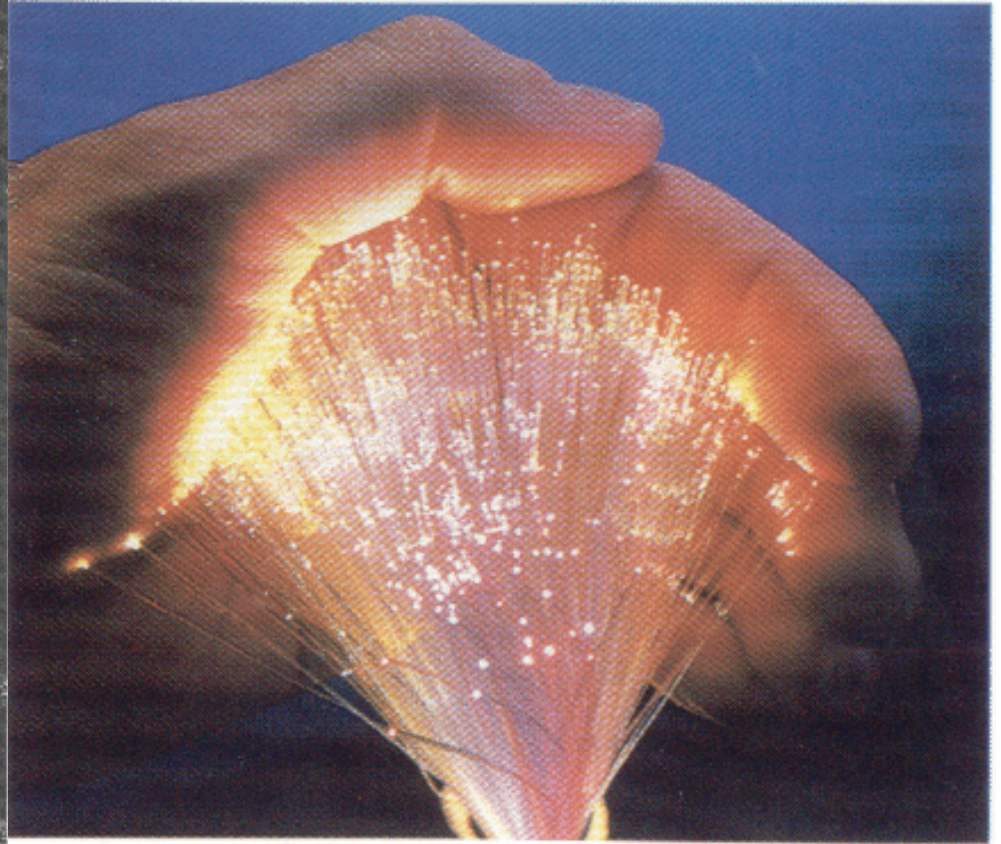
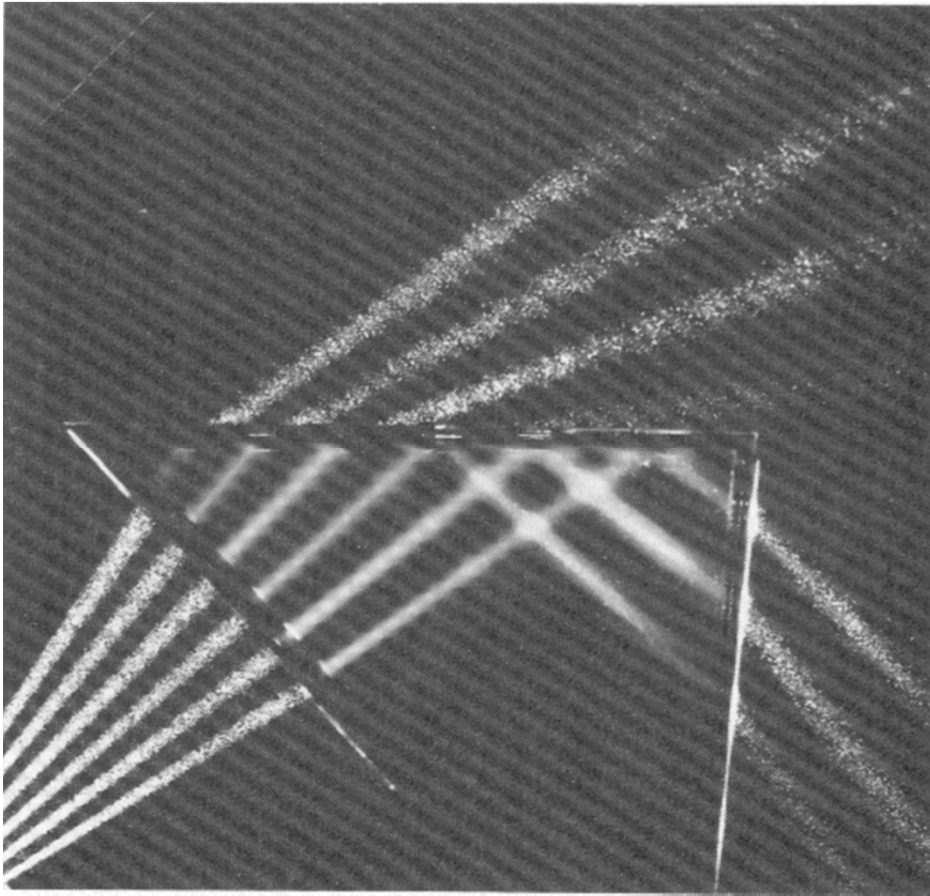
$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \frac{\pi}{2} = n_2$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

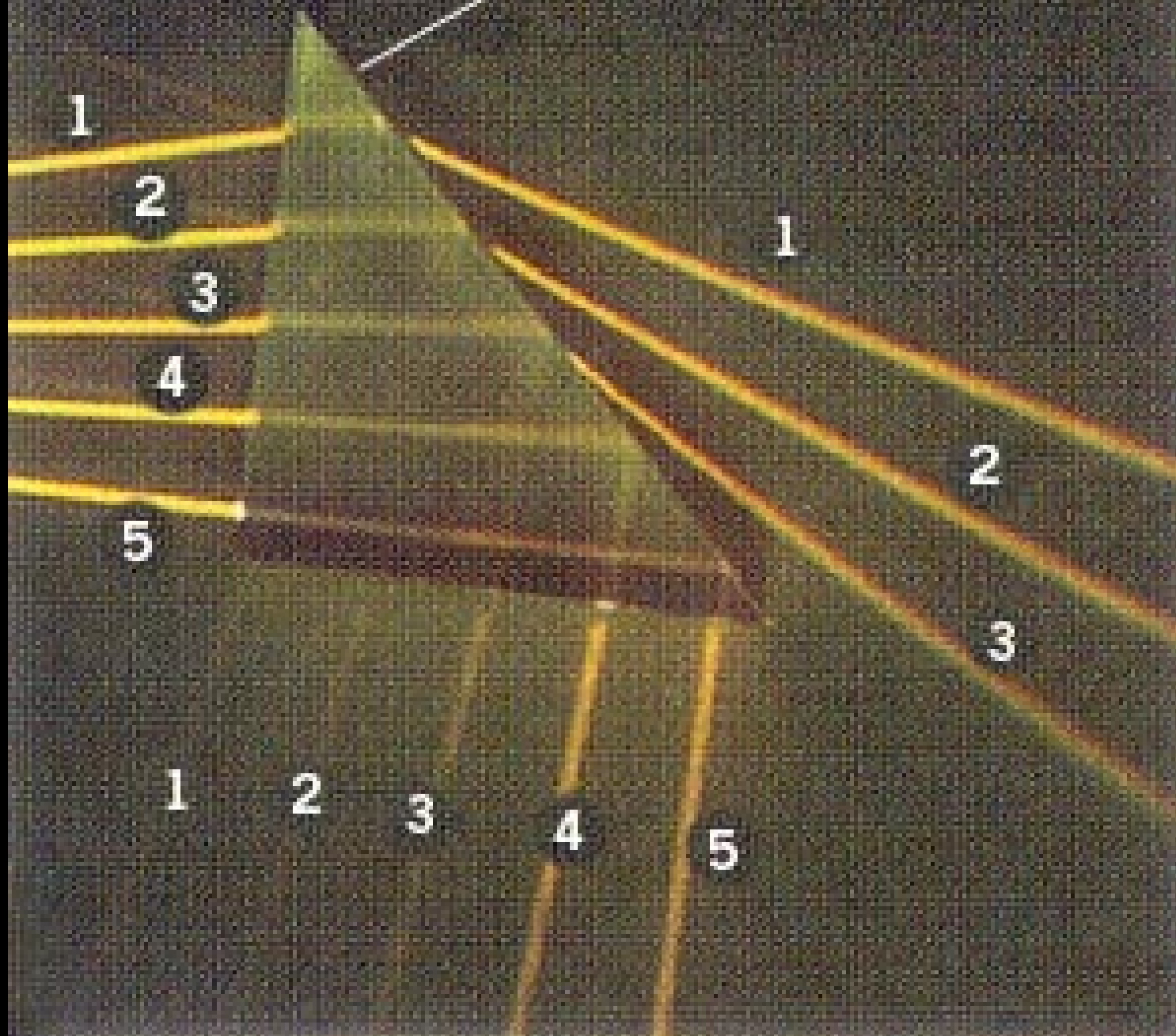


Ondas eletromagnéticas

Reflexão interna total: fibras ópticas



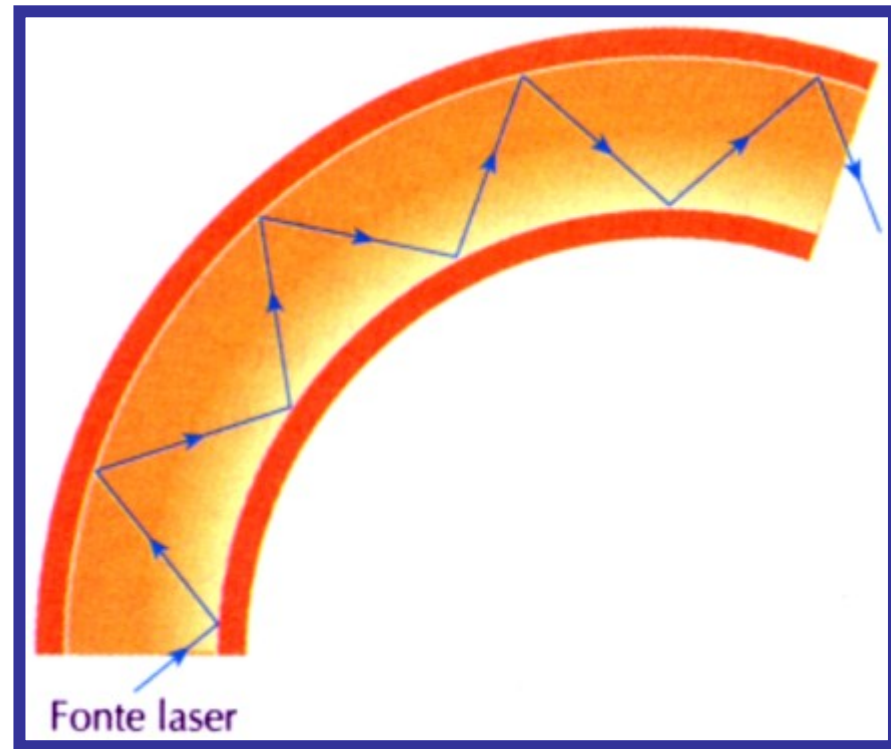
Prism



Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

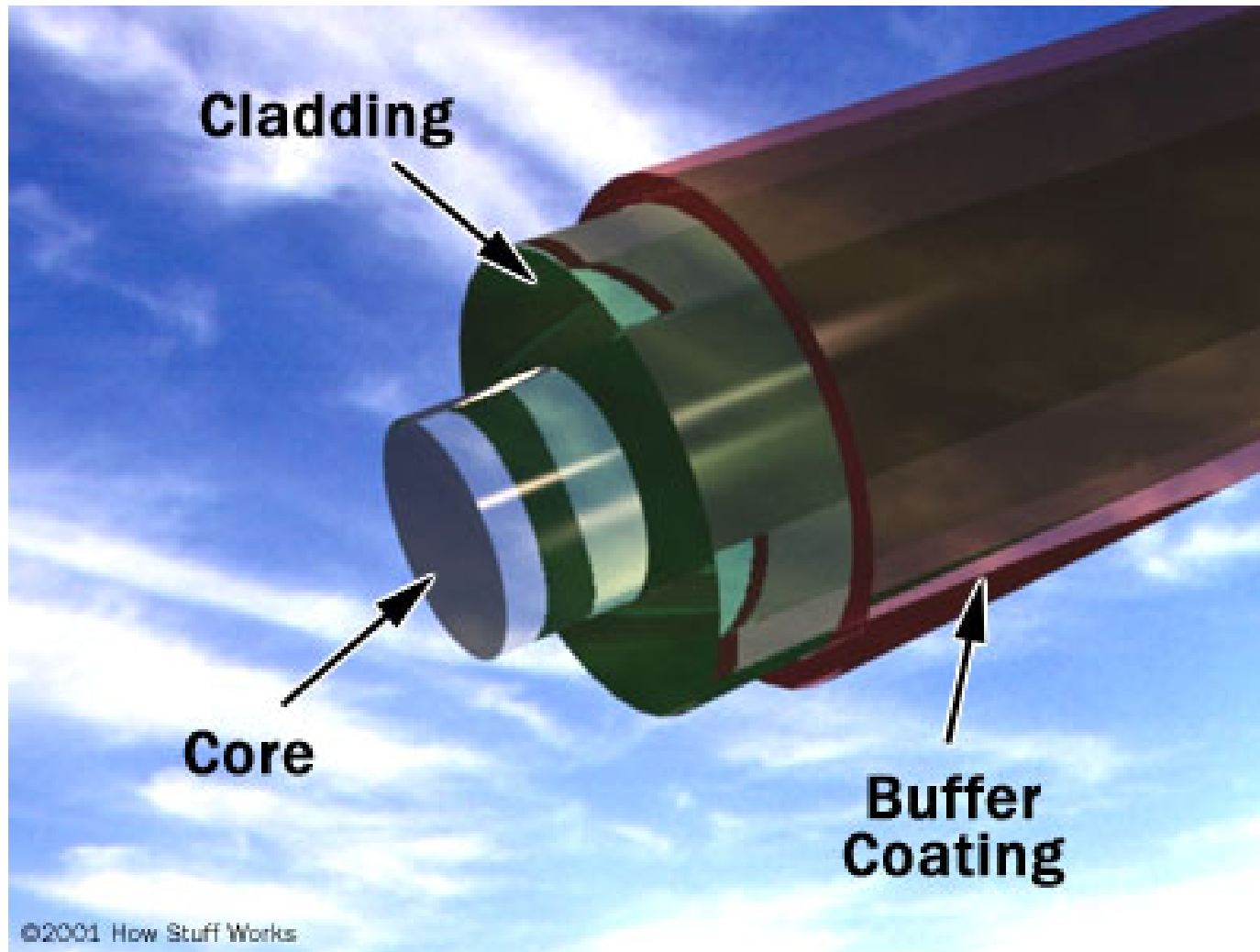
33-9 | Reflexão Interna Total

Fibra Ótica



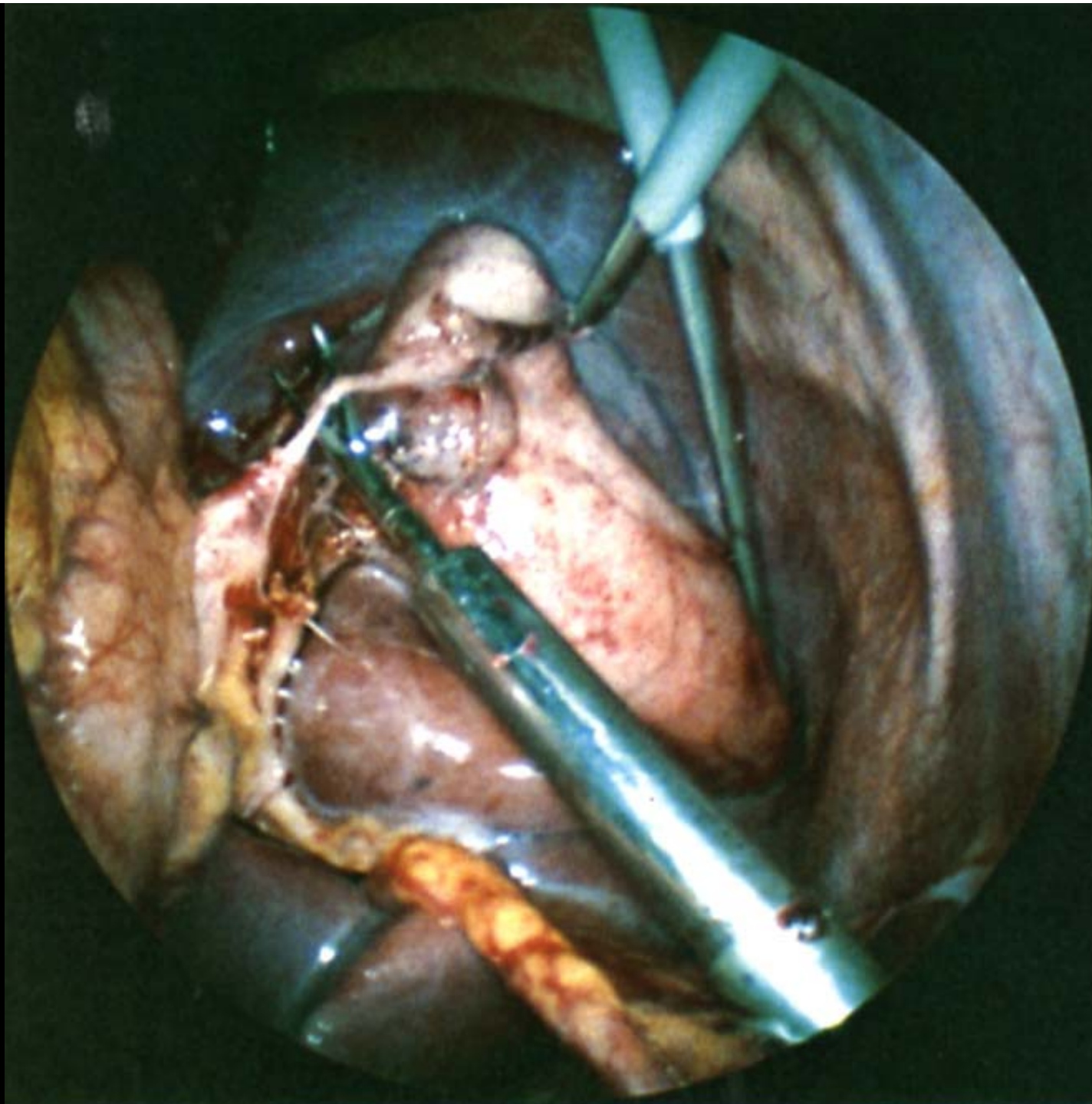
Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-9 | Reflexão Interna Total



$$n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$$





Ondas eletromagnéticas

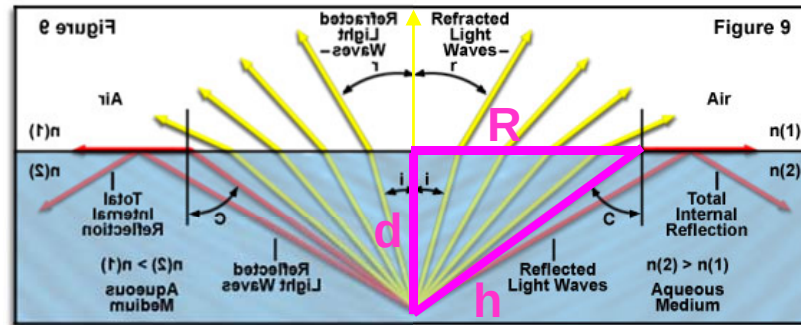
Problema 5

Uma fonte luminosa pontual está 80,0 cm abaixo da superfície de uma piscina. Calcule o diâmetro do círculo, na superfície, através do qual a luz emerge da água.

Uma fonte luminosa pontual está 80,0 cm abaixo da superfície de uma piscina. Calcule o diâmetro do círculo, na superfície, através do qual a luz emerge da água.

$$d = 0,8 \text{ m}$$

$$h = (d^2 + R^2)^{1/2}$$



$$n_{H_2O} \sin \theta_c = n_{ar} \sin 90^\circ = n_{ar}$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_{ar}}{n_{H_2O}} = \frac{1}{1,33} \approx 0,752 = \frac{R}{h} = \frac{R}{(d^2 + R^2)^{1/2}}$$

$$0,565(d^2 + R^2) = R^2 \rightarrow 0,565(0,8^2) = R^2(1 - 0,565)$$

$$R^2 \approx 0,832 \rightarrow R \approx 0,912 \text{ m} ; D = 2R \approx 1,824 \text{ m}$$

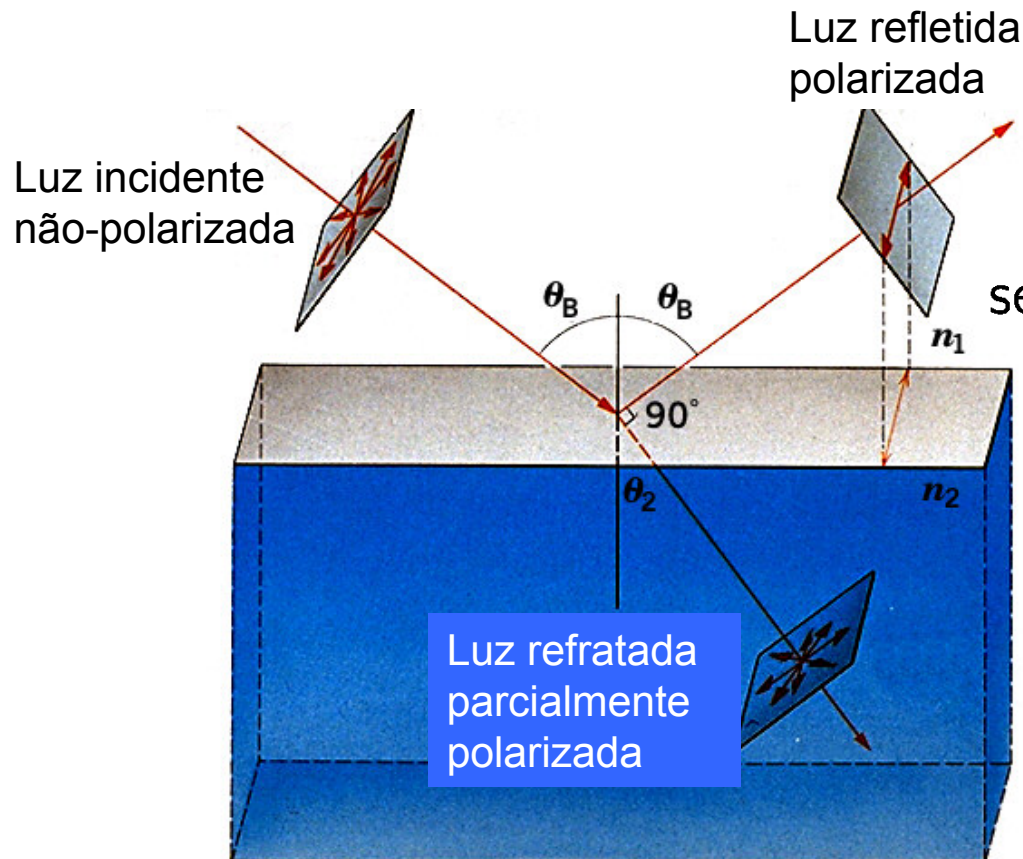
$$D \approx 182 \text{ cm}$$

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-10 | Polarização por Reflexão

Lei de Brewster

Num ângulo particular:



$$\theta_B + \theta_2 = 90^\circ$$

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_2 = \sin(90^\circ - \theta_B) = \cos \theta_B$$

$$\Rightarrow \theta_B = \arctg \frac{n_2}{n_1}$$

Ondas eletromagnéticas

Polarização por reflexão

A luz refletida por uma superfície é totalmente polarizada na direção perpendicular ao plano de incidência quando

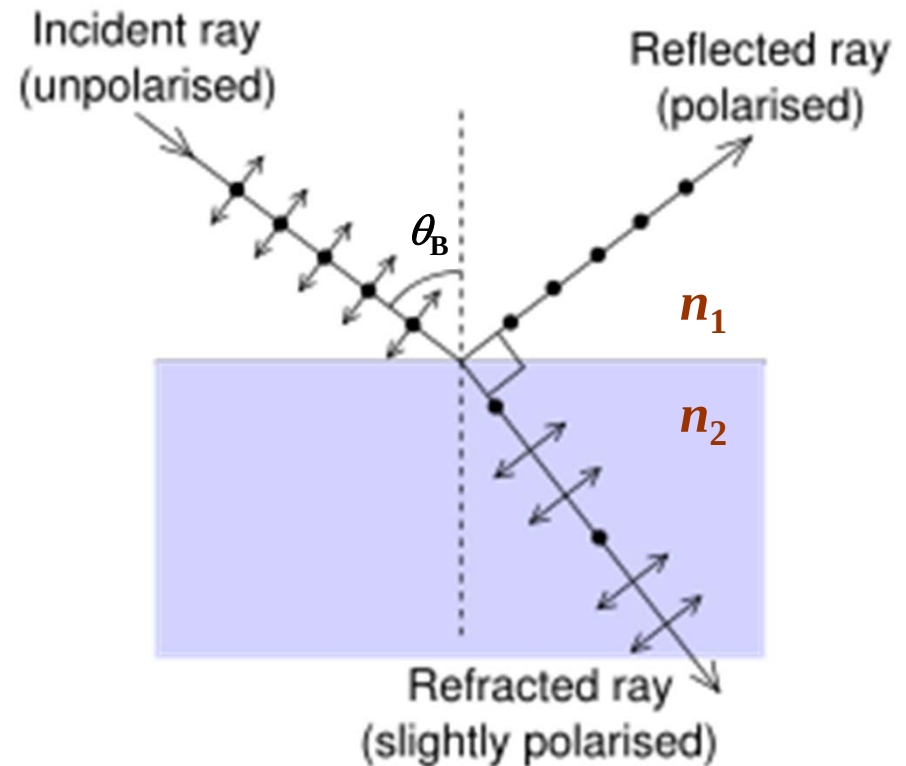
$$\theta_i + \theta_r = \frac{\pi}{2}$$

Então

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \left(\theta_i - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\Rightarrow \tan \theta_i = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \theta_i \equiv \theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \\ \theta_B : \text{ângulo de Brewster} \end{array} \right.$$



Exemplo de aplicação polarização da luz

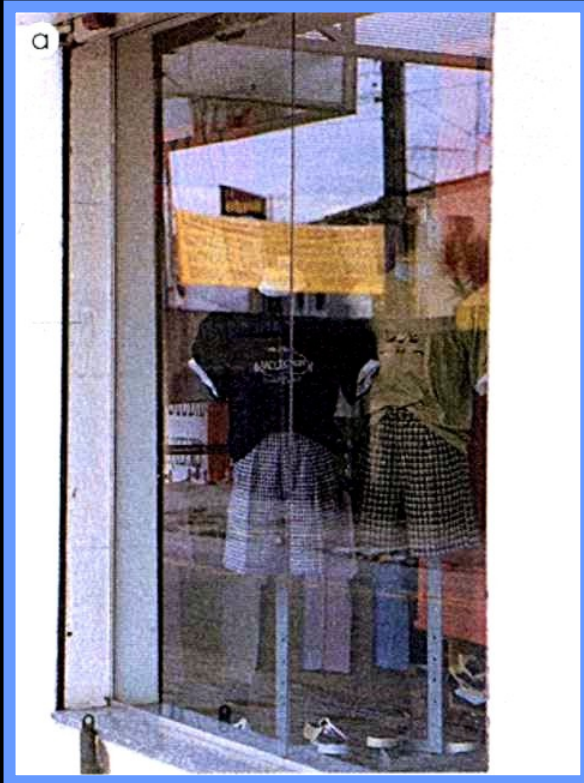


Foto sem lente polarizadora Foto com lente polarizadora

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

REVISÃO E RESUMO

Ondas Eletromagnéticas Uma onda eletromagnética é formada por campos elétricos e magnéticos variáveis. As várias frequências possíveis de ondas eletromagnéticas constituem um *espectro*, do qual uma pequena parte constitui a luz visível. Uma onda eletromagnética que se propaga na direção do eixo x possui um campo elétrico $\vec{E}$ e um campo magnético $\vec{B}$ cujos módulos dependem de x e t :

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

e
$$B = B_m \sin(kx - \omega t), \quad (33-1, 33-2)$$

onde E_m e B_m são as amplitudes de $\vec{E}$ e $\vec{B}$. O campo elétrico induz o campo magnético e vice-versa. A velocidade de qualquer onda eletromagnética no vácuo é c , que pode ser escrita como

$$c = \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad (33-5, 33-3)$$

onde E e B são os módulos dos campos em um instante qualquer.

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

Fluxo de Energia A taxa por unidade de área com a qual a energia é transportada por uma onda eletromagnética é dada pelo vetor de Poynting $\vec{S}$:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}. \quad (33-19)$$

A direção de $\vec{S}$ (que é também a direção de propagação da onda e a direção do fluxo de energia) é perpendicular às direções de $\vec{E}$ e $\vec{B}$. A taxa média por unidade de área com a qual a energia é transportada, $S_{\text{méd}}$, é chamada de *intensidade* da onda e representada pelo símbolo I :

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{\text{rms}}^2, \quad (33-26)$$

onde $E_{\text{rms}} = E_m/\sqrt{2}$. Uma *fonte pontual* de ondas eletromagnéticas emite as ondas *isotropicamente*, isto é, com igual intensidade em todas as direções. A intensidade das ondas a uma distância r de uma fonte pontual de potência P_s é dada por

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2}. \quad (33-27)$$

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

Pressão da Radiação Quando uma superfície intercepta uma onda eletromagnética a onda exerce uma força e uma pressão na superfície. Quando a radiação é totalmente absorvida por uma superfície perpendicular à direção de propagação a força é dada por

$$F = \frac{IA}{c} \quad (\text{absorção total}), \quad (33-32)$$

onde I é a intensidade da radiação e A é a área da superfície. Quando a radiação é totalmente refletida a força é dada por

$$F = \frac{2IA}{c} \quad (\text{incidência perpendicular e reflexão total}). \quad (33-33)$$

A pressão da radiação p_r é a força por unidade de área:

$$p_r = \frac{I}{c} \quad (\text{absorção total}) \quad (33-34)$$

e

$$p_r = \frac{2I}{c} \quad (\text{incidência perpendicular e reflexão total}). \quad (33-35)$$

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

Polarização Dizemos que uma onda eletromagnética é **polarizada** quando o vetor campo elétrico se conserva sempre no mesmo plano, que é chamado de *plano de oscilação*. A luz produzida por uma lâmpada comum não é polarizada; dizemos que uma luz desse tipo é **não-polarizada** ou **polarizada aleatoriamente**.

Filtros Polarizadores Quando se faz a luz passar por um filtro polarizador apenas a componente do campo elétrico paralela à **direção de polarização** do filtro é *transmitida*; a componente perpendicular à direção de polarização é absorvida pelo filtro. A luz que emerge de um filtro polarizador está polarizada paralelamente à direção de polarização do filtro.

Quando a luz que incide em um filtro polarizador é não-polarizada a intensidade da luz transmitida, I , é metade da intensidade original I_0 :

$$I = \frac{1}{2} I_0. \quad (33-36)$$

Quando a luz que incide no filtro polarizador já está polarizada a intensidade da luz transmitida depende do ângulo θ entre a direção de polarização da luz incidente e a direção de polarização do filtro:

$$I = I_0 \cos^2 \theta. \quad (33-38)$$

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

Ótica Geométrica *Ótica geométrica* é o tratamento aproximado da luz no qual as ondas luminosas são representadas como raios que se propagam em linha reta.

Reflexão e Refração Quando um raio luminoso encontra uma interface entre dois meios transparentes em geral aparecem um raio **refletido** e um raio **refratado**. Os dois raios estão sempre no plano de incidência. O **ângulo de reflexão** é igual ao ângulo de incidência, e o **ângulo de refração** está relacionado ao ângulo de incidência através da lei de Snell,

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (\text{refração}), \quad (33-40)$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios nos quais se propagam o raio incidente e o raio refratado.

Reflexão Interna Total Uma onda que incide em uma interface com um meio cujo índice de refração é menor que o do

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

meio no qual está se propagando experimenta **reflexão interna total** se o ângulo de incidência é maior que um **ângulo crítico** θ_c dado por

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ângulo crítico}). \quad (33-44)$$

Polarização por Reflexão Uma onda refletida é totalmente **polarizada**, com o vetor $\vec{E}$ perpendicular ao plano de incidência, quando o ângulo de incidência é igual ao **ângulo de Brewster** θ_B , dado por

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ângulo de Brewster}). \quad (33-49)$$