



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

“PPE6408 – Tópicos Especiais de Física”

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)

Área I
Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Tel. (12) 3159-5007/3153-3209

USP Lorena
www.eel.usp.br

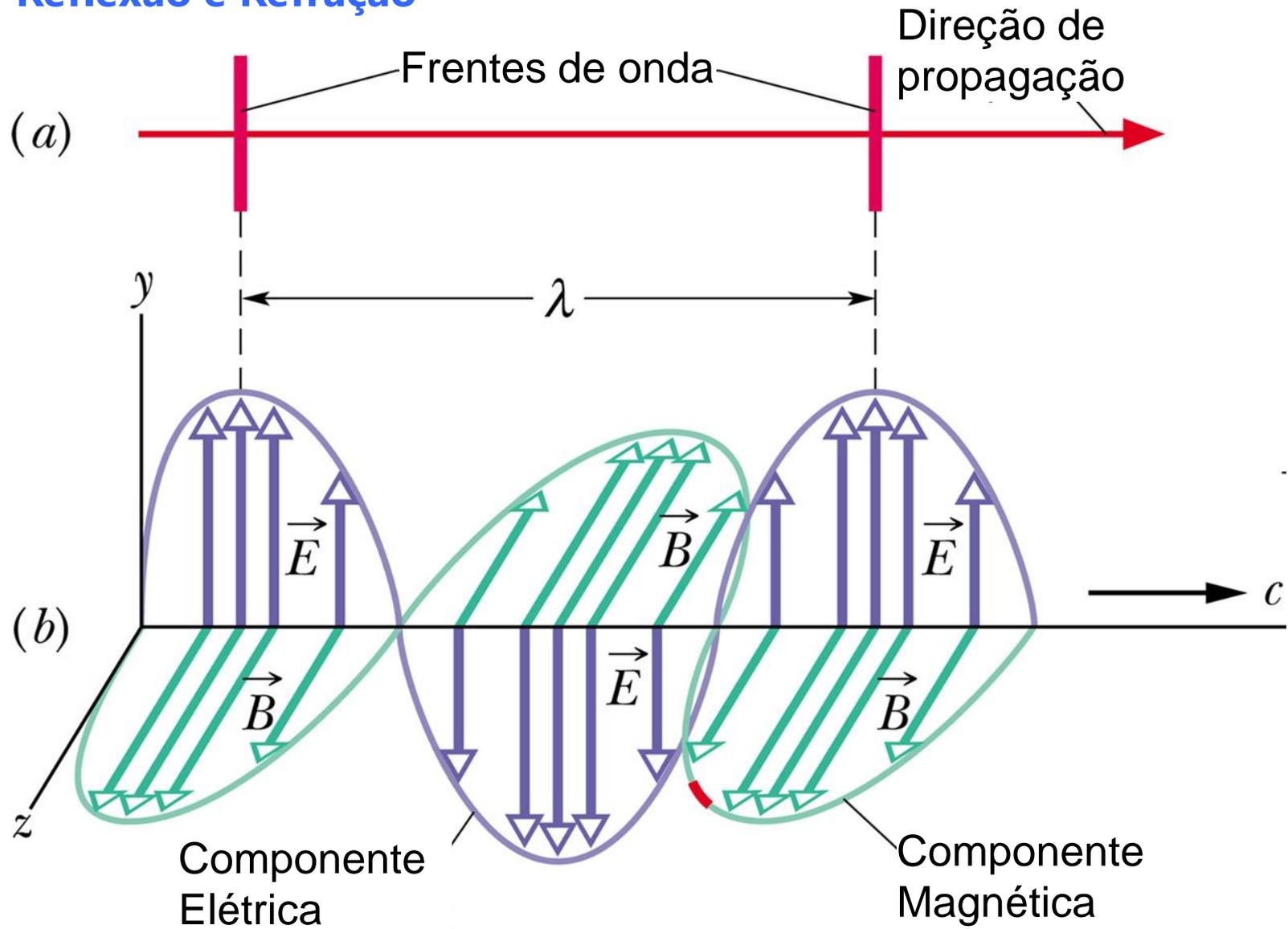
Área II
Polo Urbo-Industrial Gleba AI-6
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Tel. (12) 3159-9900

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

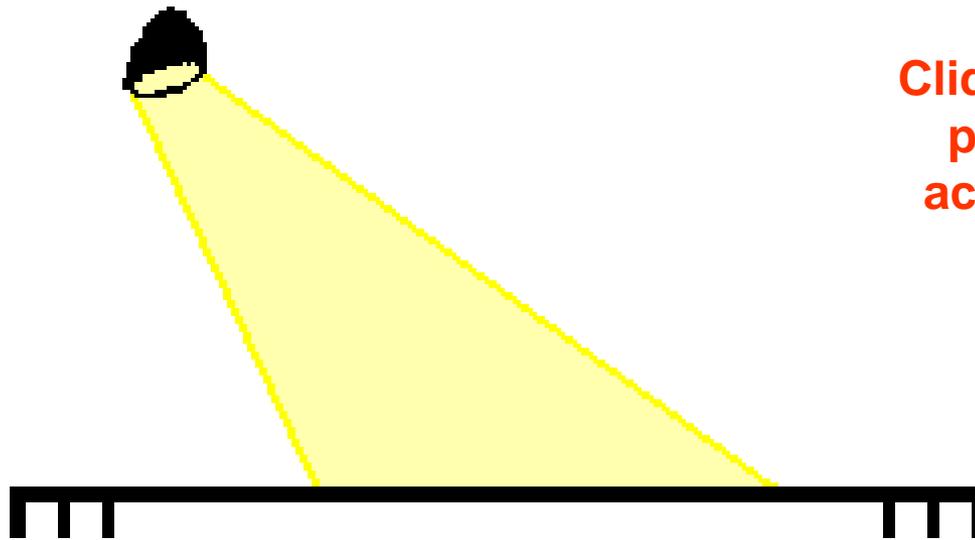
fonte de luz



superfície refletora

Aqui você pode ver a luz
chegando na superfície
refletora

fonte de luz

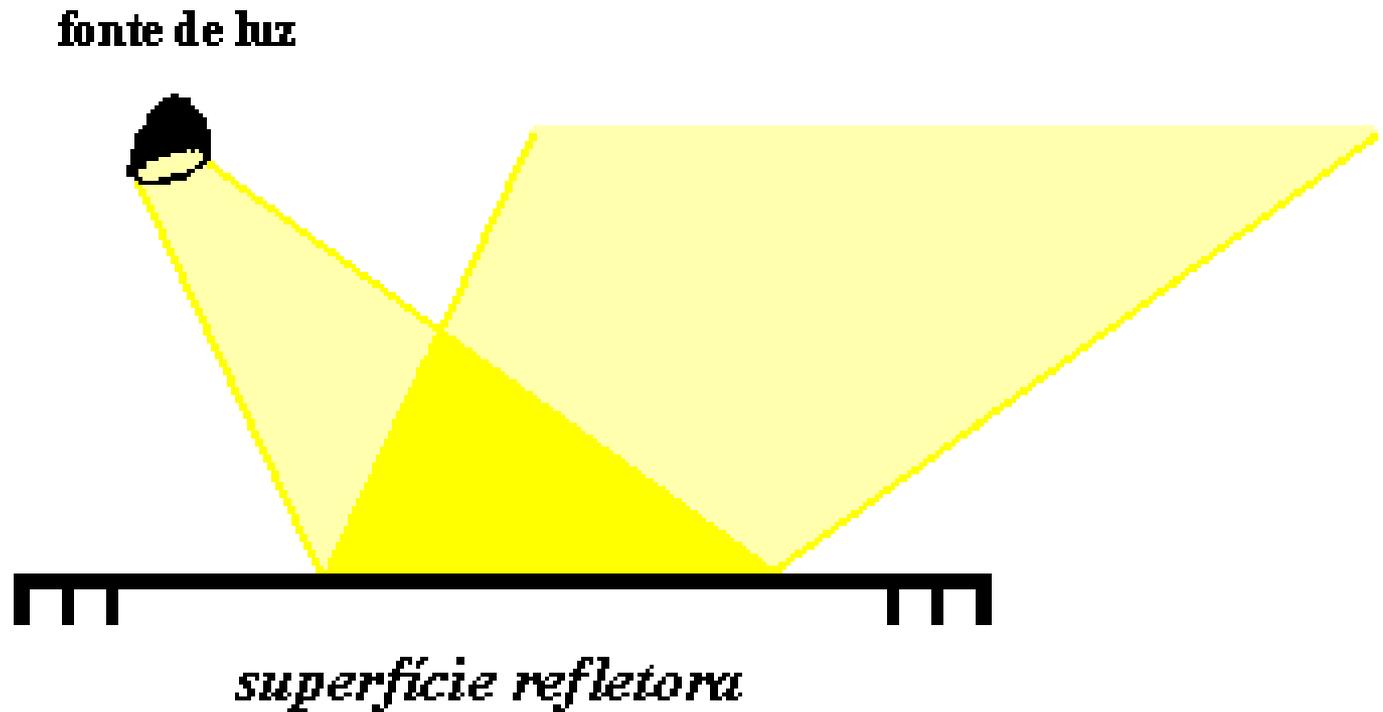


Clique novamente
para ver o que
acontece depois

superfície refletora

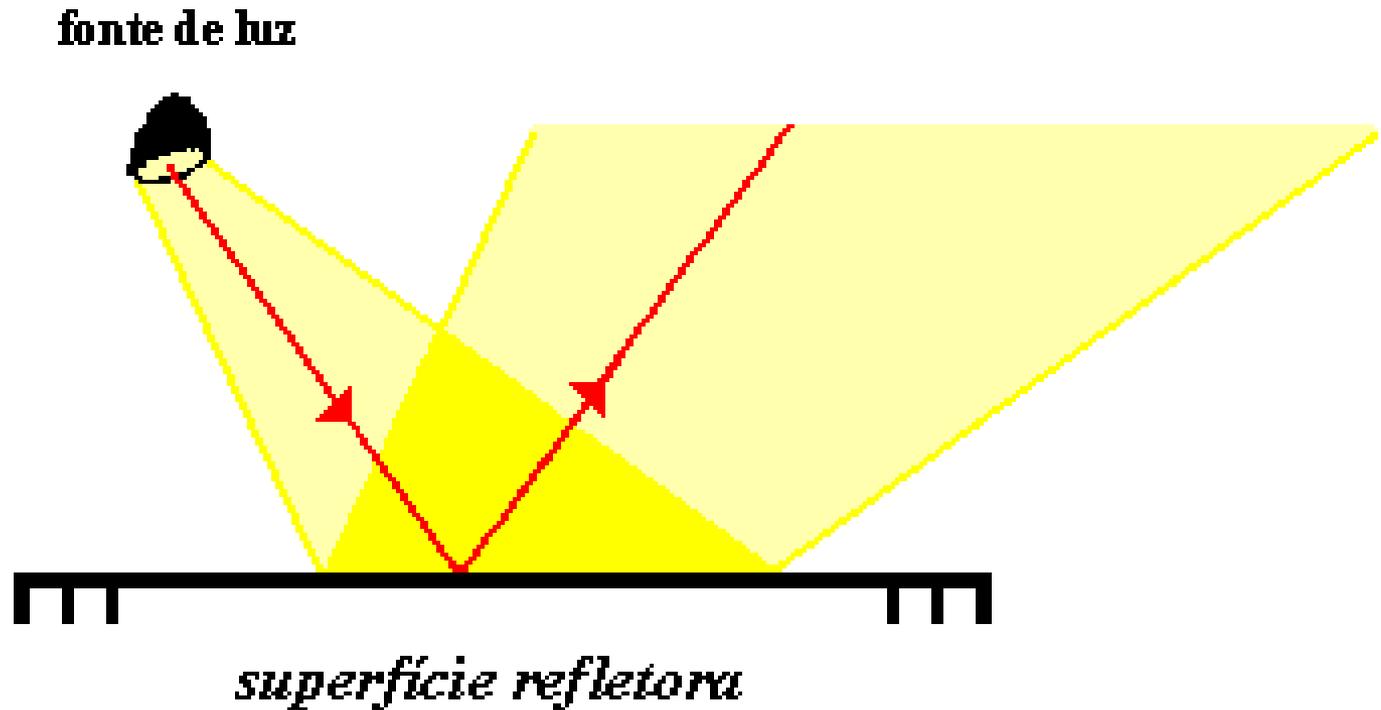
Agora vamos escolher um raio de luz deste pincel

Clique novamente



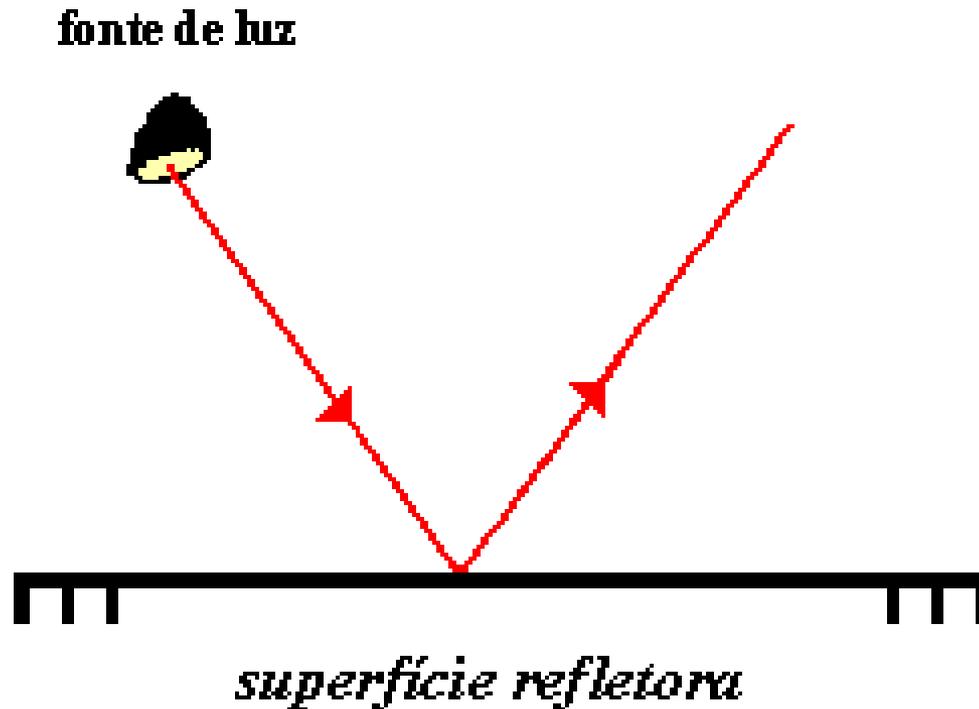
Ok, raio de luz escolhido !!!

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



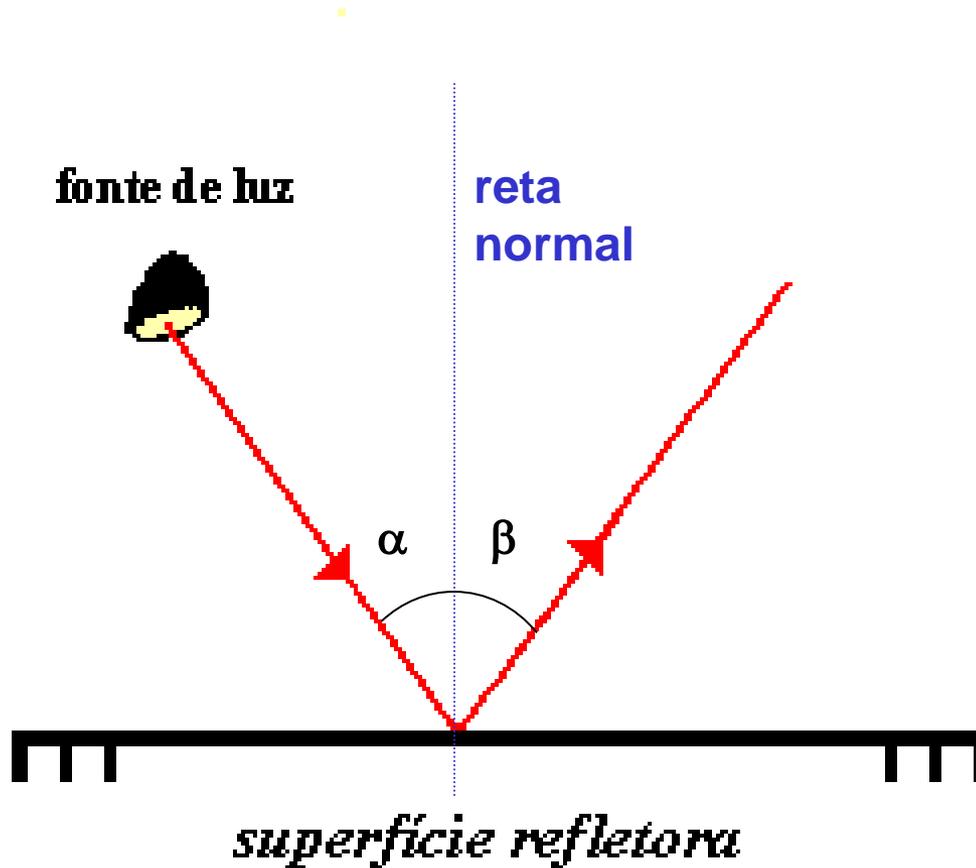
Ok, raio de luz escolhido !!!

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

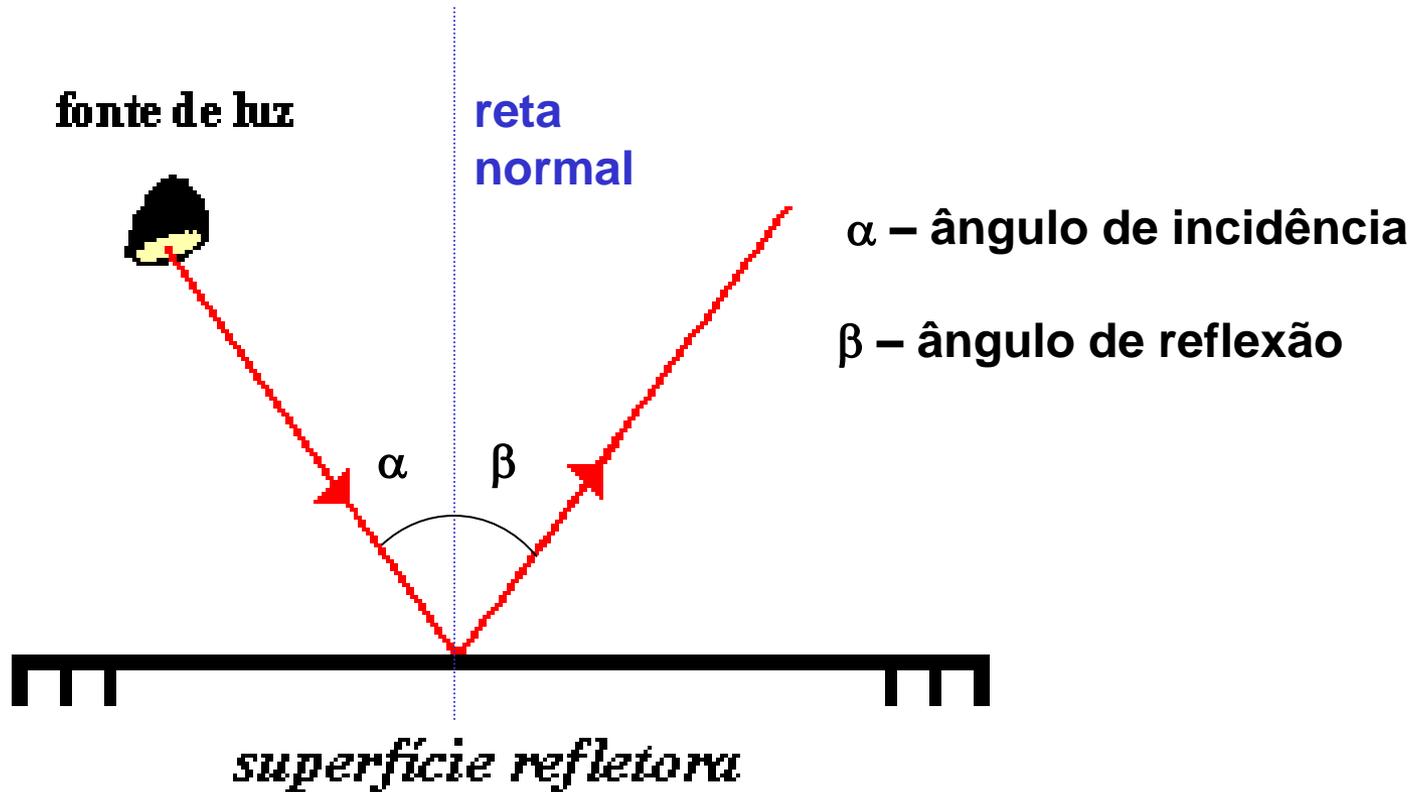


Tudo o que estudarmos para este raio
poderá ser usado para qualquer outro

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>

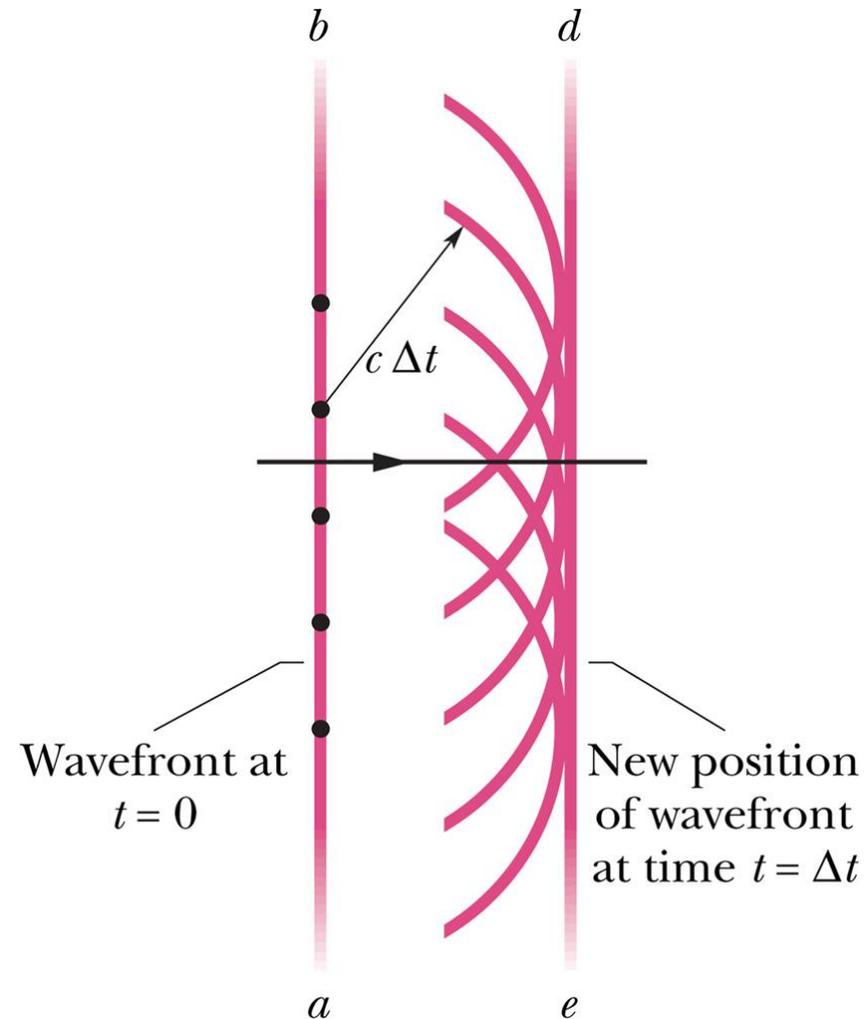
Interferência



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.

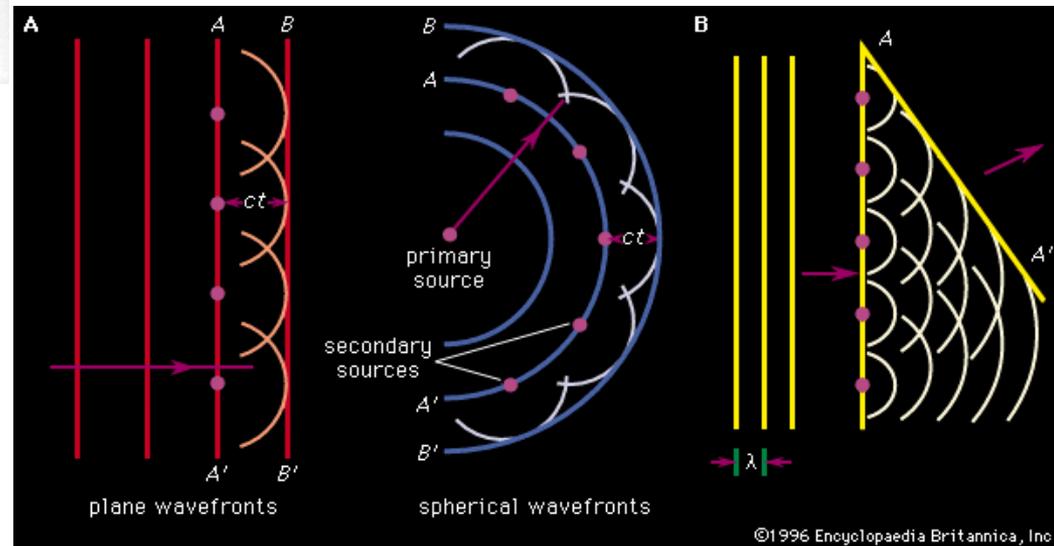
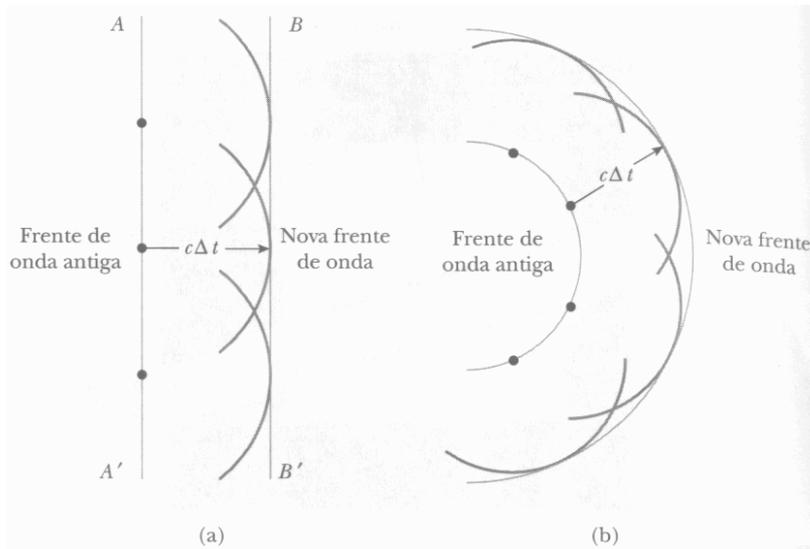
Princípio de Huygens: Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo Δt a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.

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

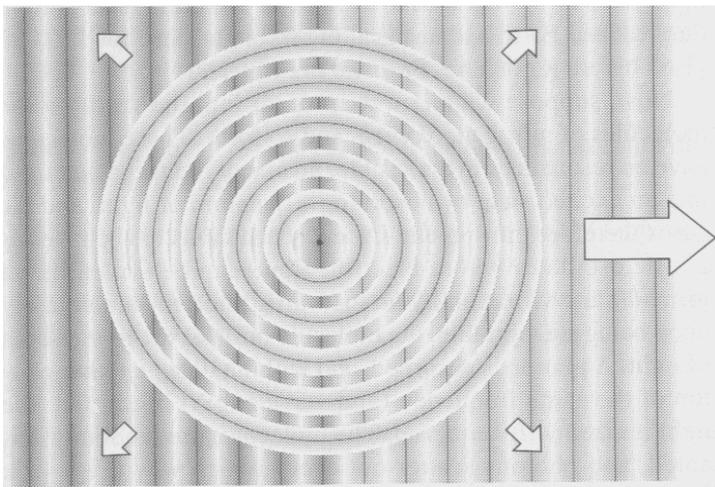


Ondas eletromagnéticas

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

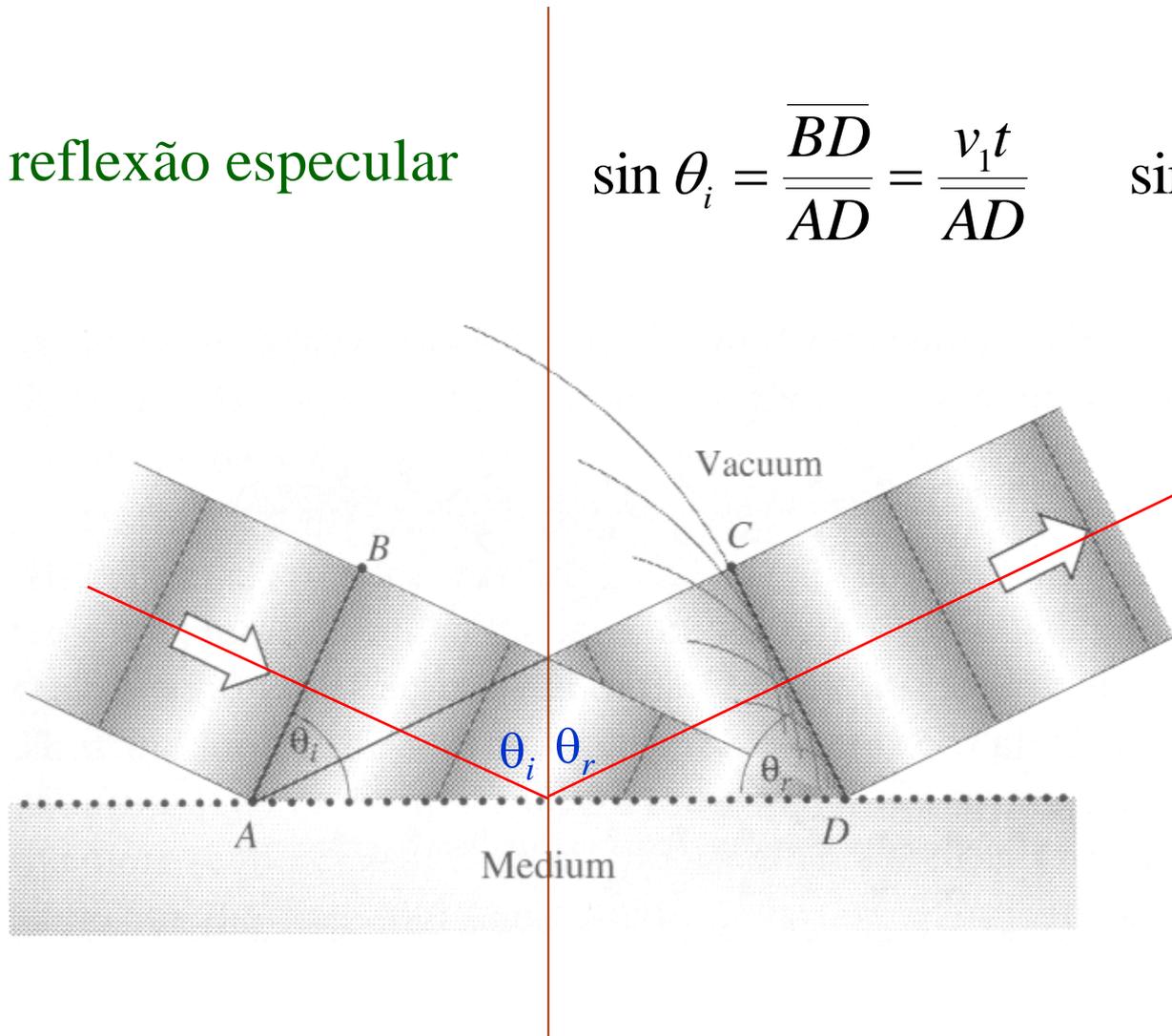
reflexão especular

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

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

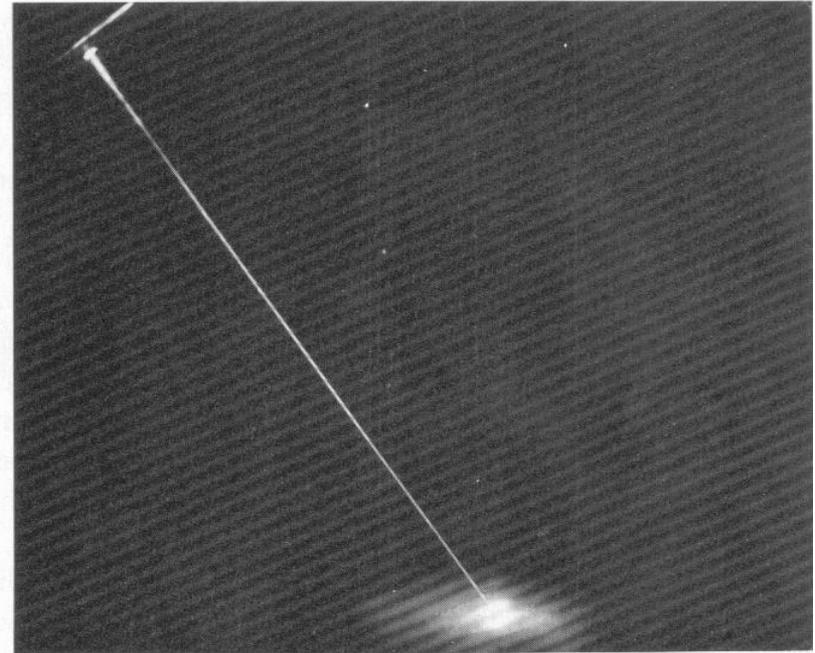
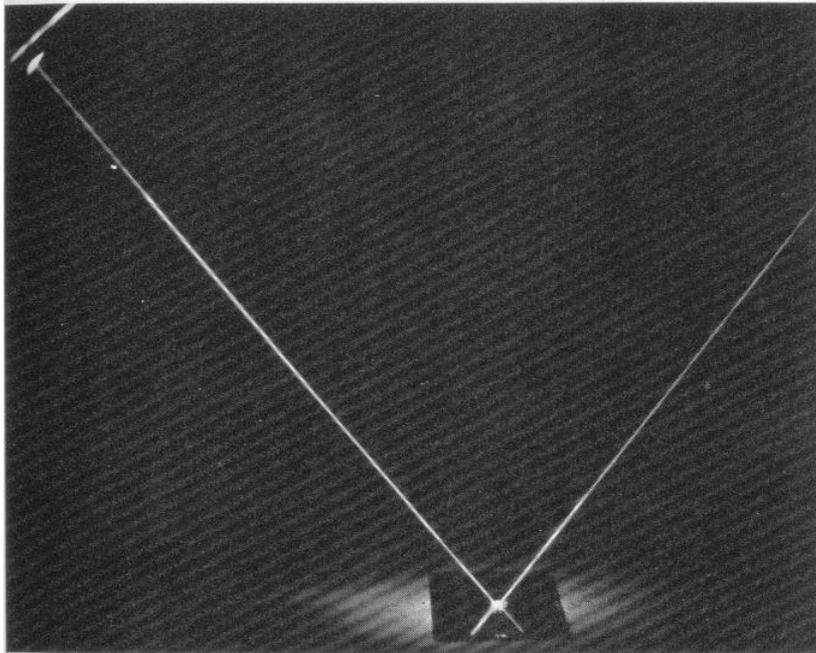
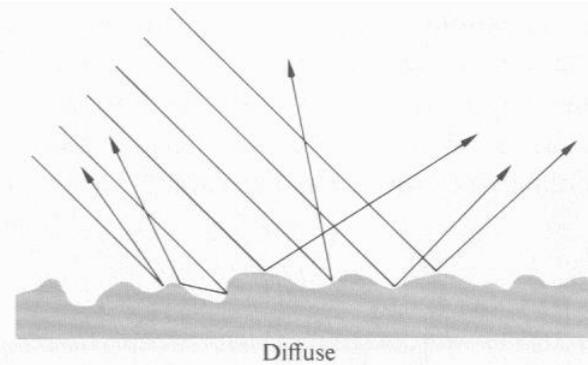
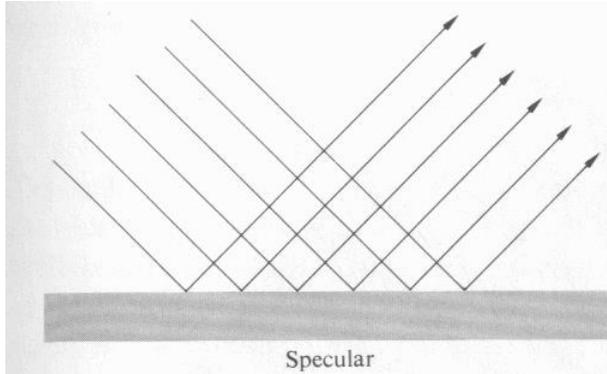


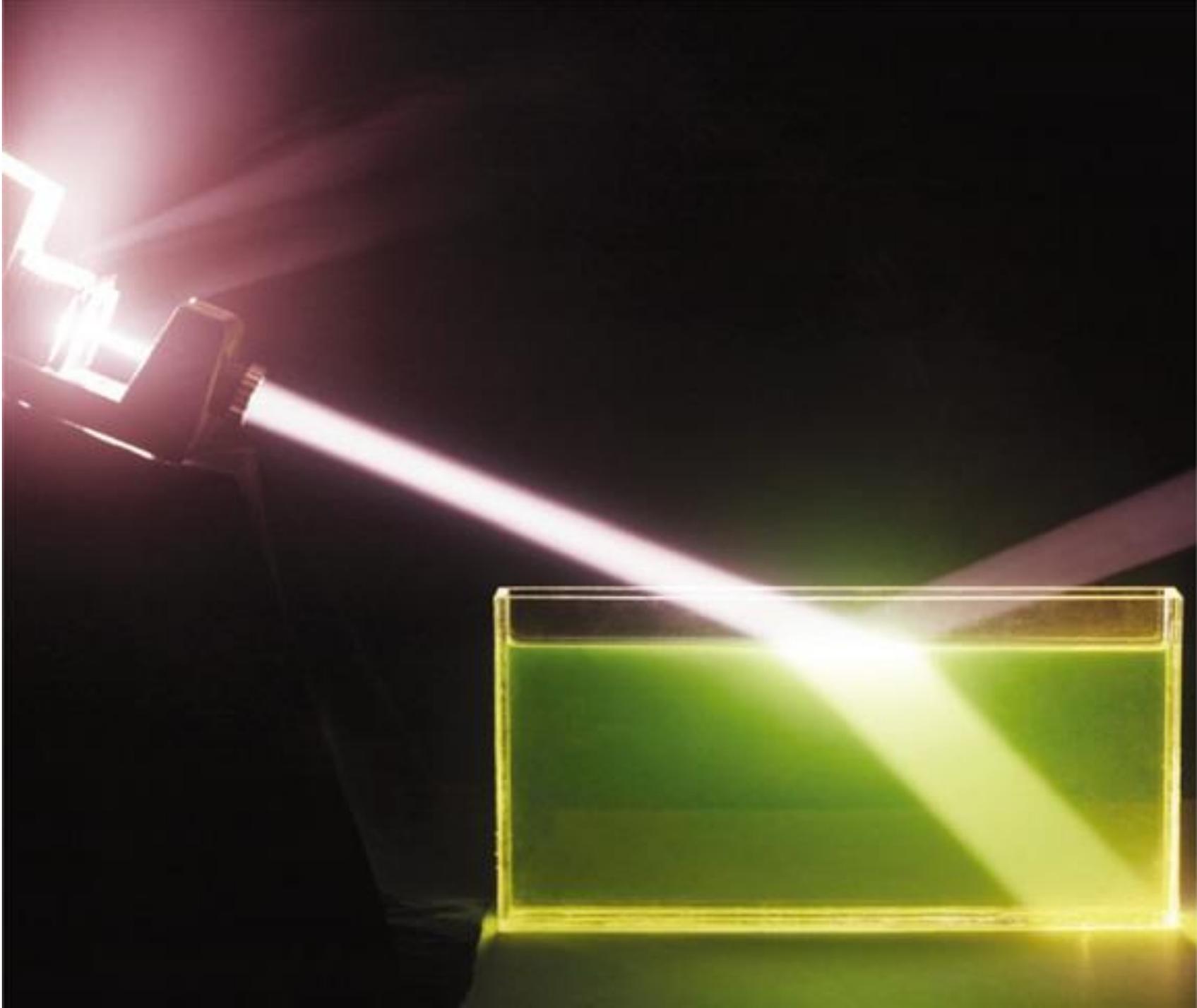
$$\theta_i = \theta_r$$



Ondas eletromagnéticas

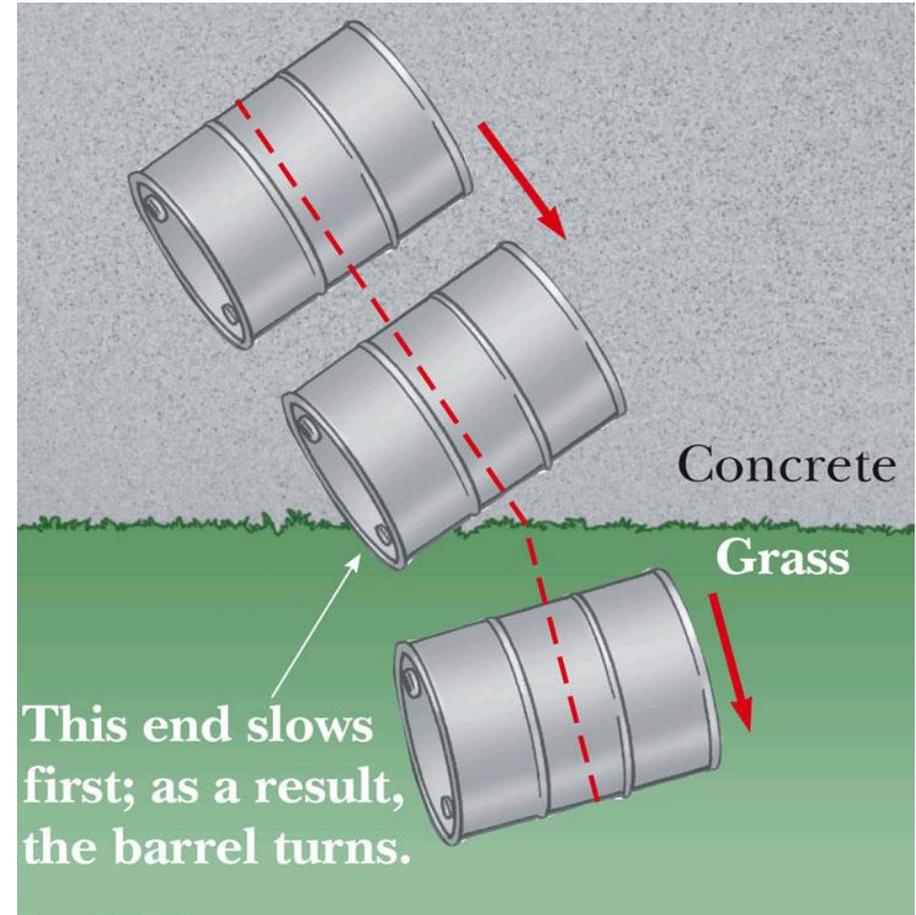
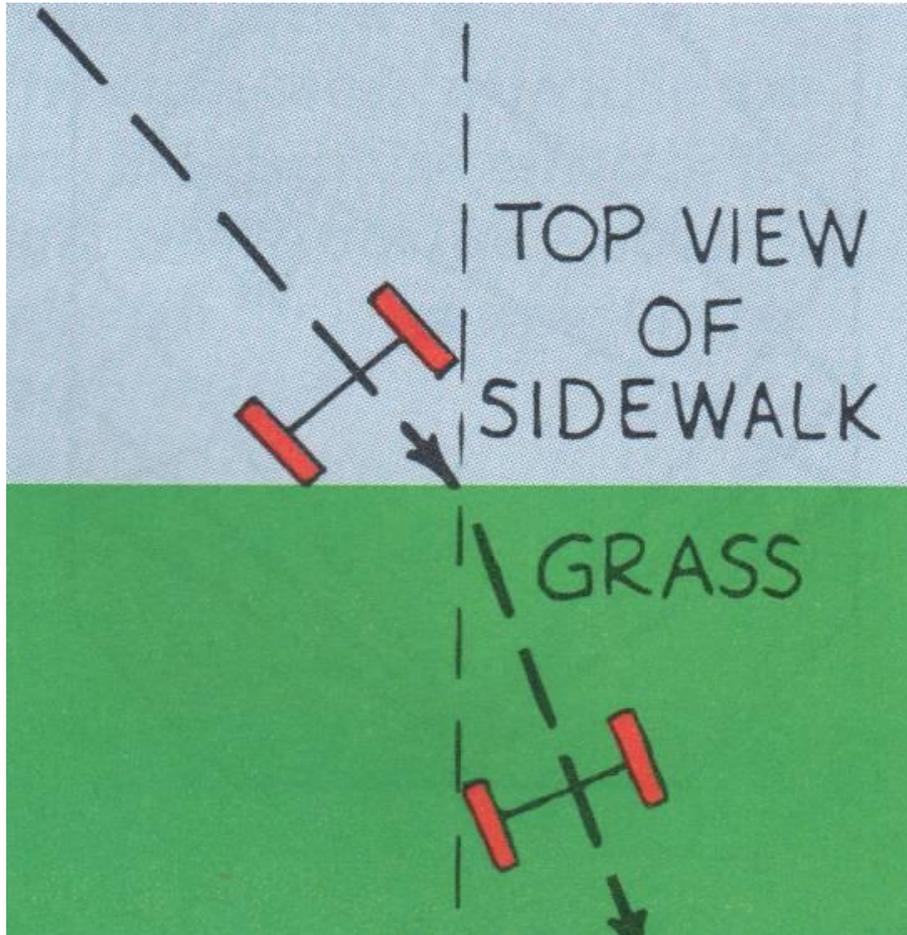
Reflexão e refração: reflexão especular x reflexão difusa



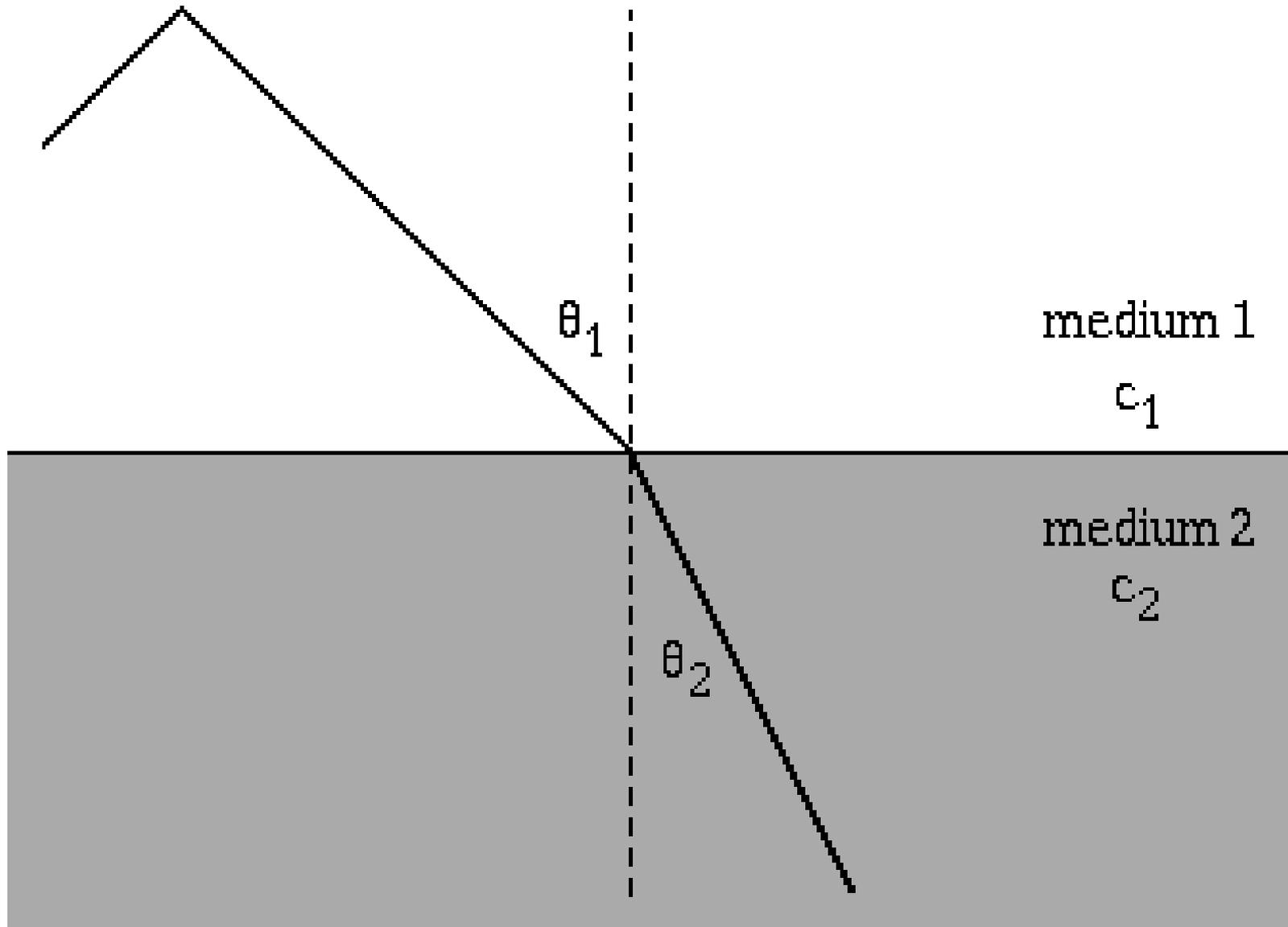


Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração



Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

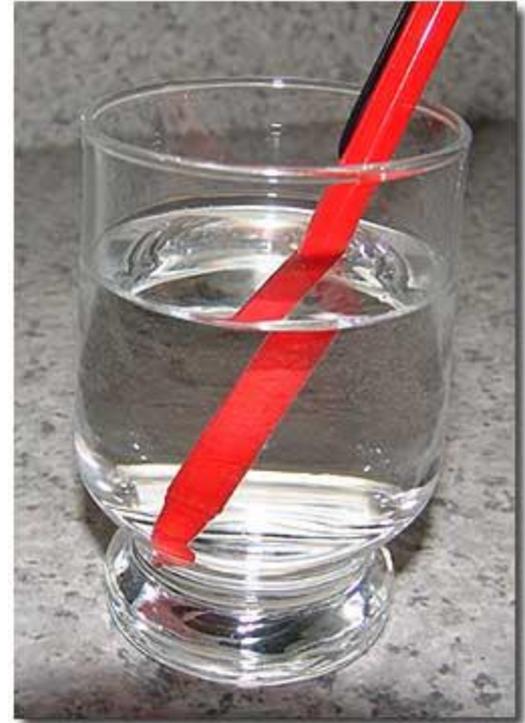
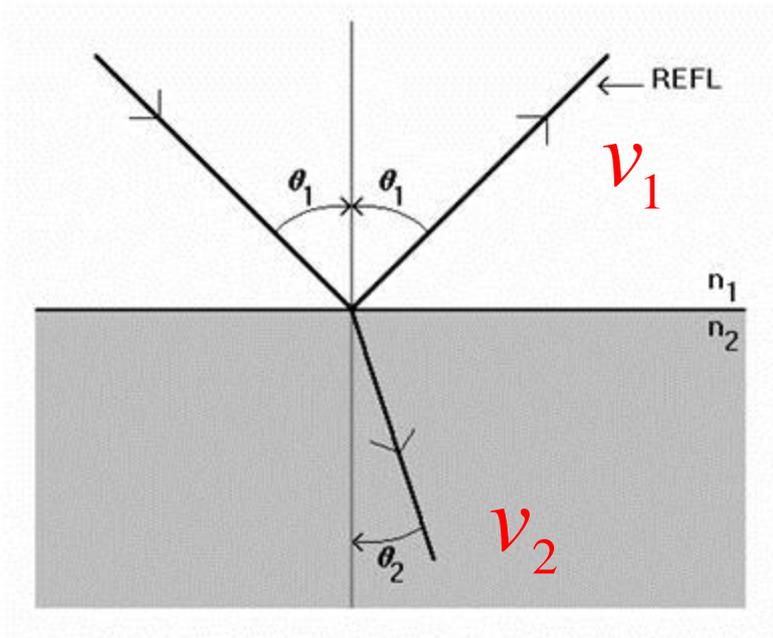


Ondas eletromagnéticas

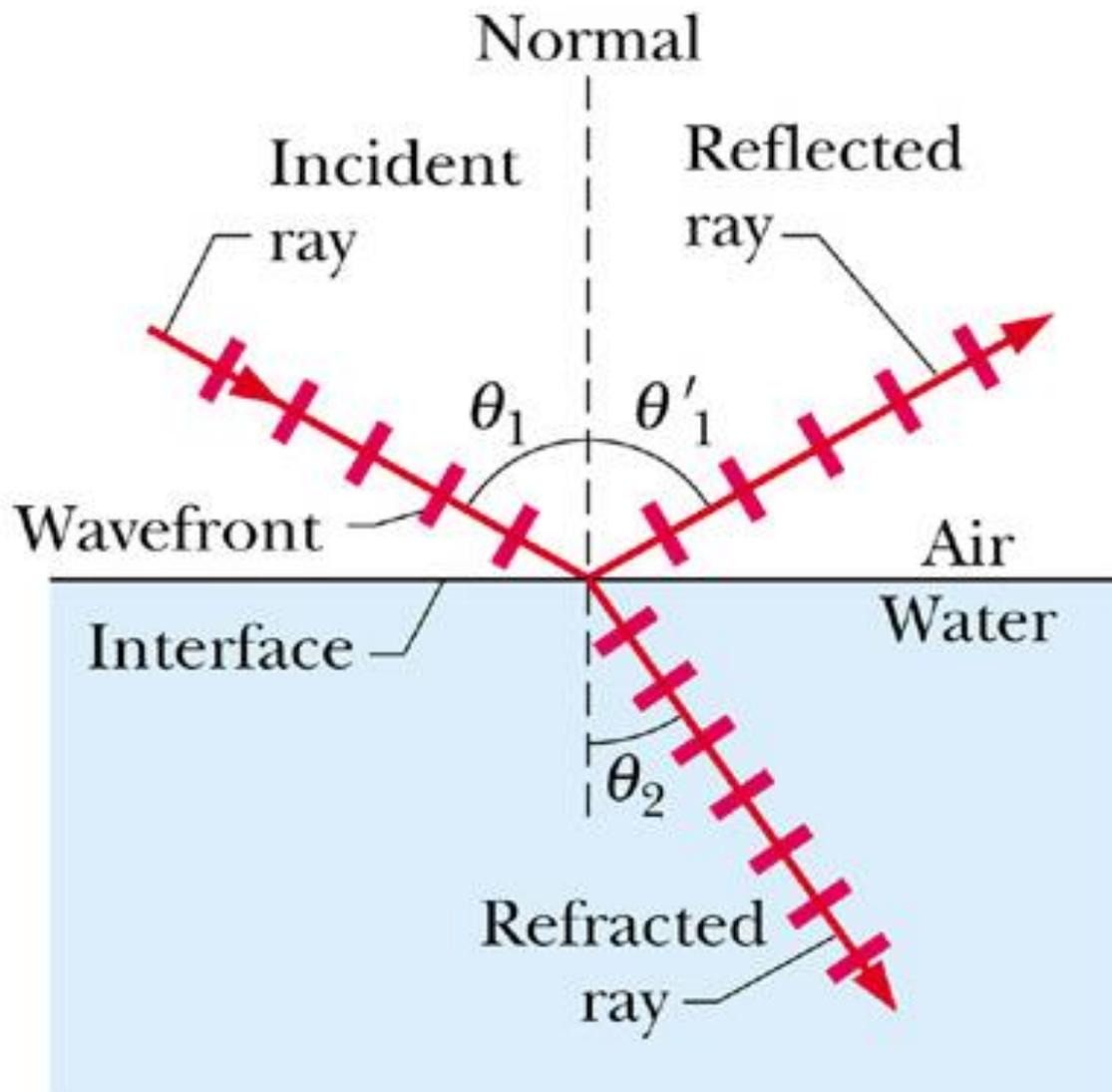
Reflexão e refração

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:

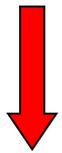
Refração: $n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$

Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração: Lei de Snell

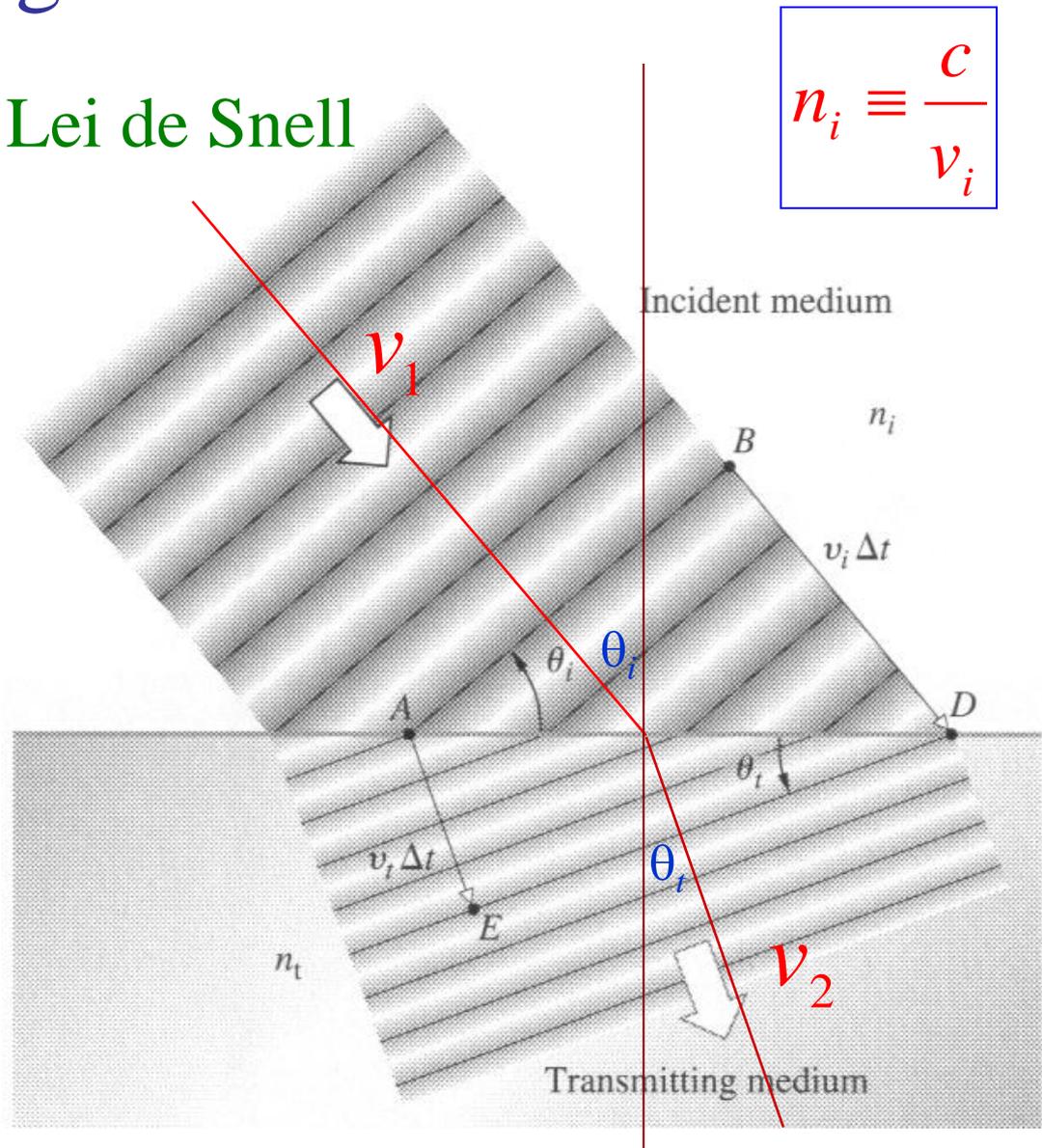
$$\text{sen } \theta_i = \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}} = \frac{v_i t}{AD}$$

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



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

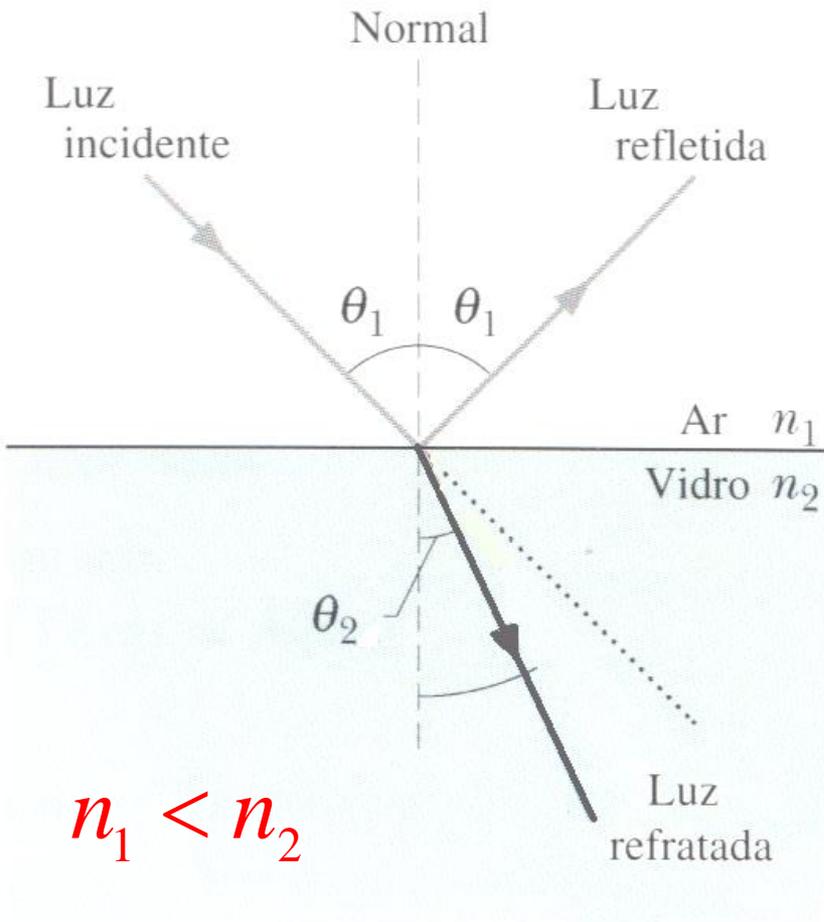
onde $\theta_1 = \theta_i$
 $\theta_2 = \theta_t$



Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração: Lei de Snell

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

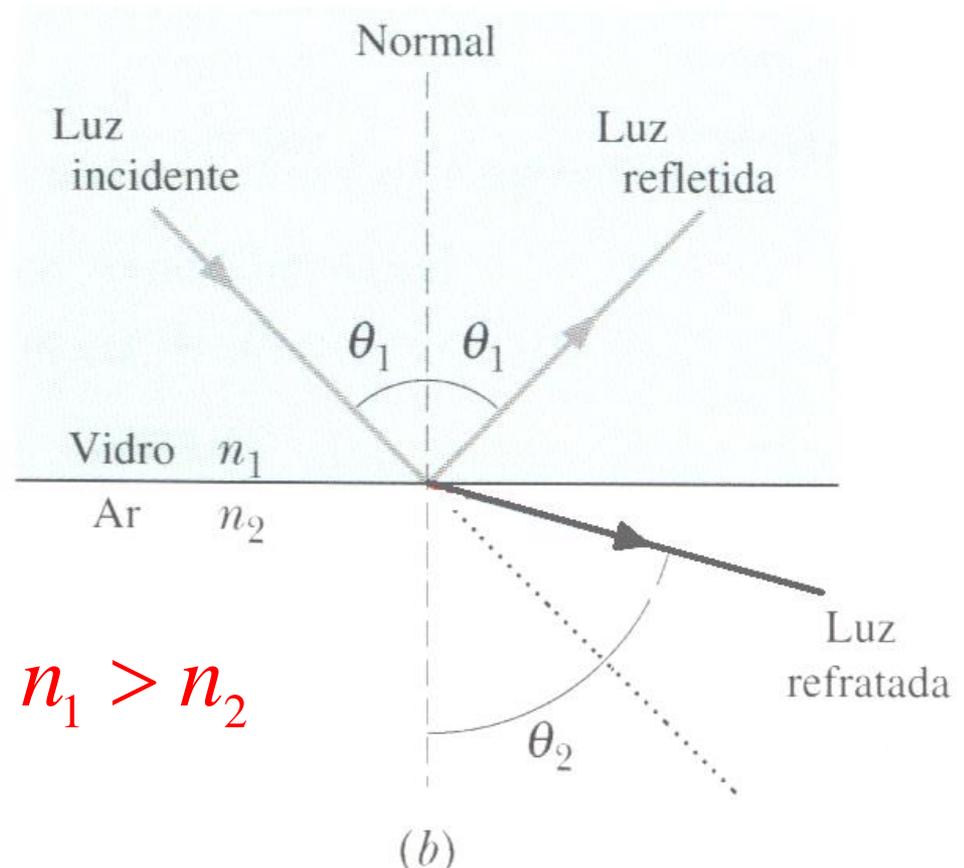
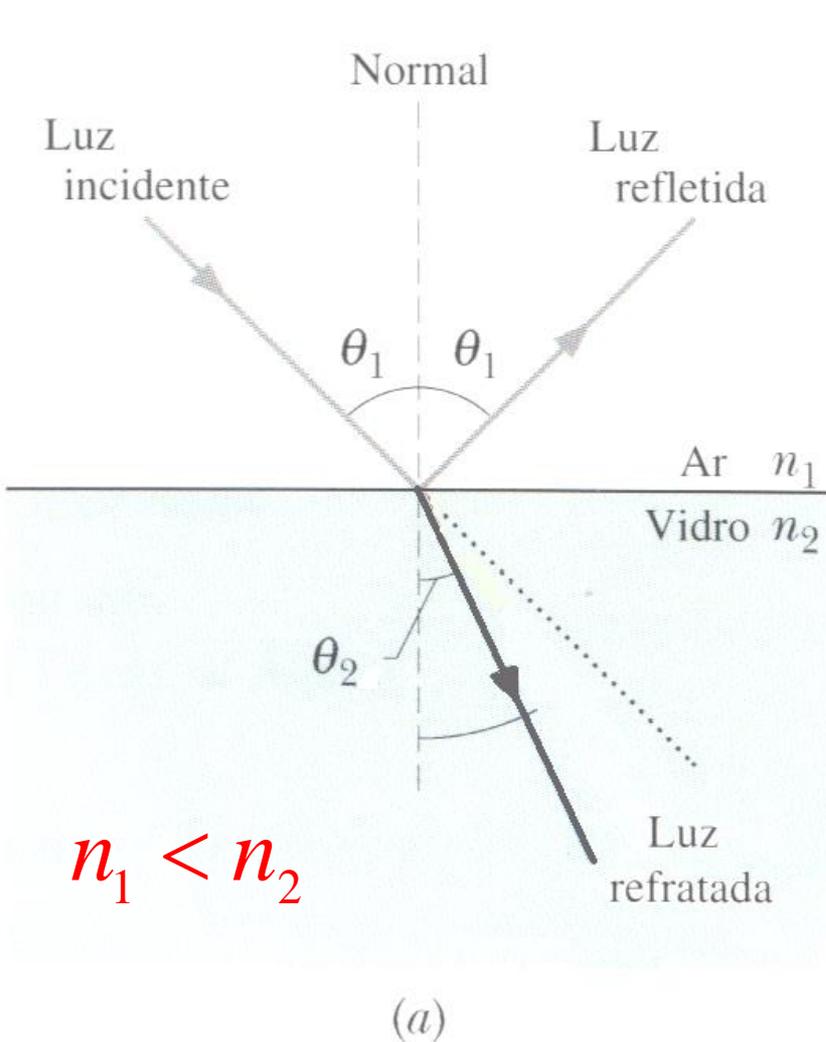


(a)

Ondas eletromagnéticas

Reflexão e refração: Lei de Snell

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



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:

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.

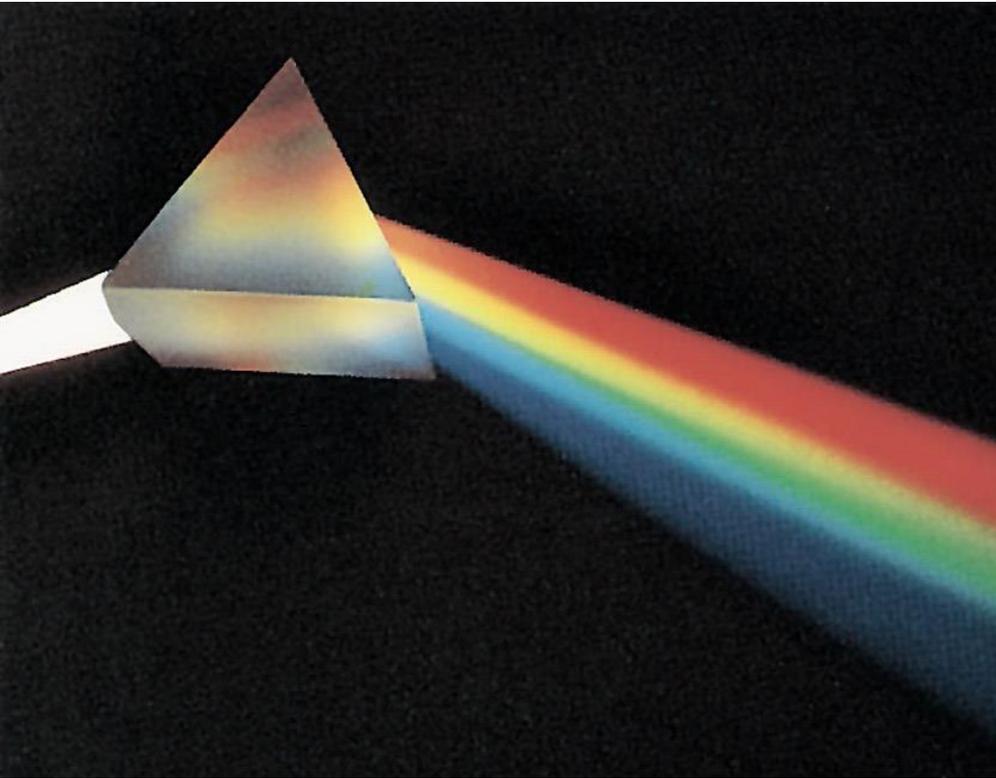
33-8 | Reflexão e Refração

❖ *Dispersão Cromática:*

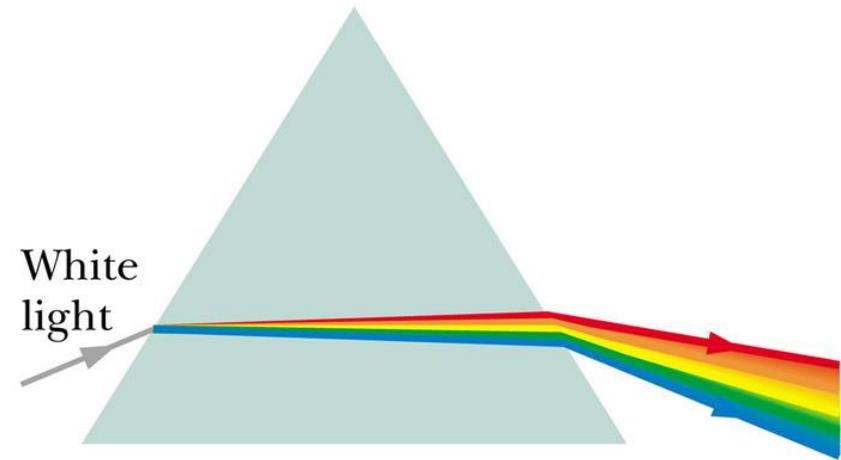
Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração

❖ Dispersão Cromática:



(a)

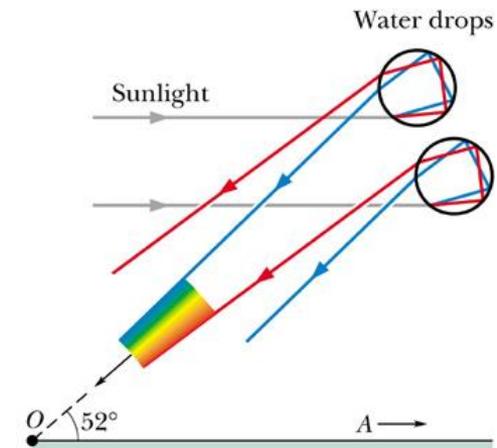
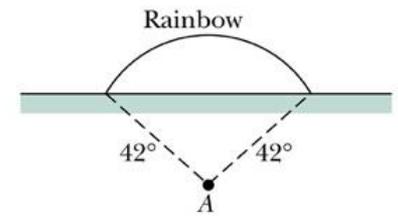
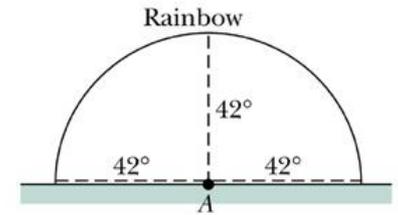
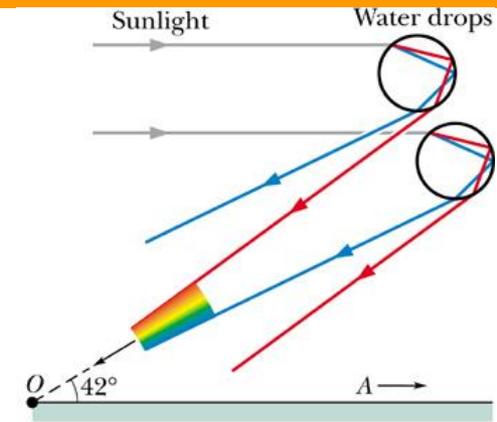


(b)

Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-8 | Reflexão e Refração

❖ O Arco-Íris:



Ondas eletromagnéticas

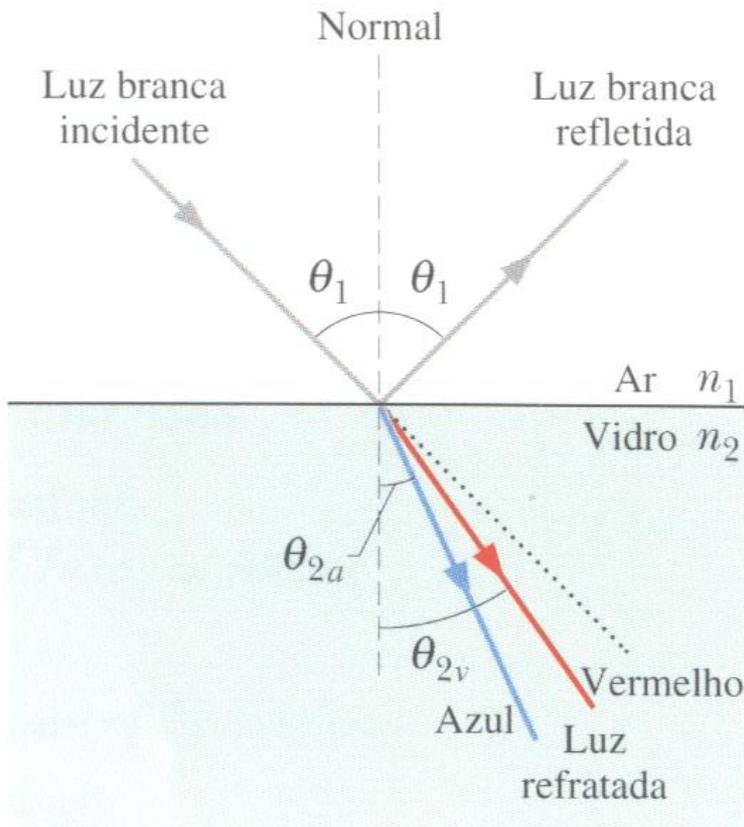
Dispersão cromática

$$n = n(\omega)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_k \vec{E}(k) \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

Luz branca

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



(a)

Ondas eletromagnéticas

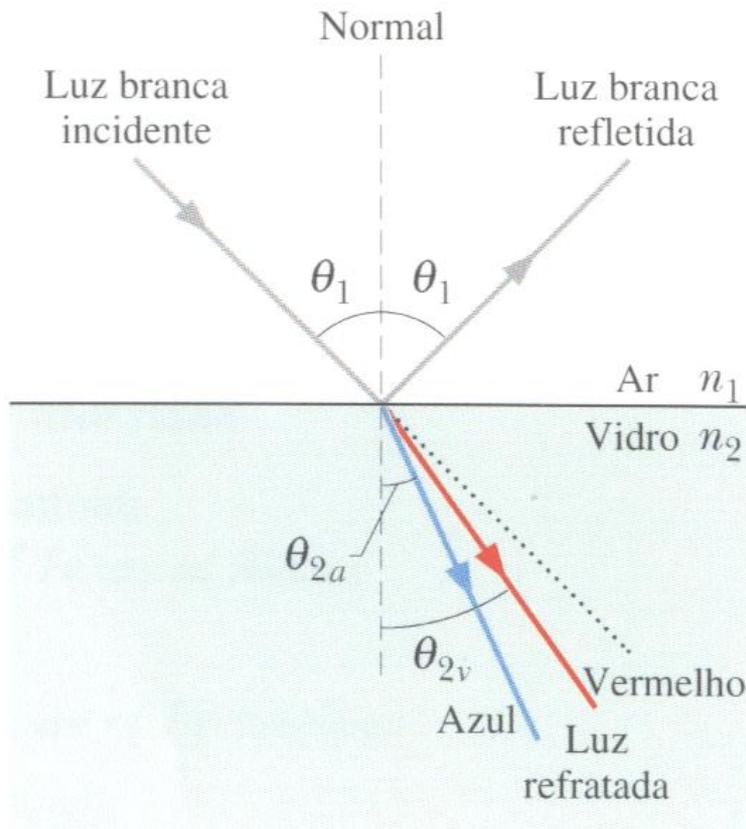
Dispersão cromática

$$n = n(\omega)$$

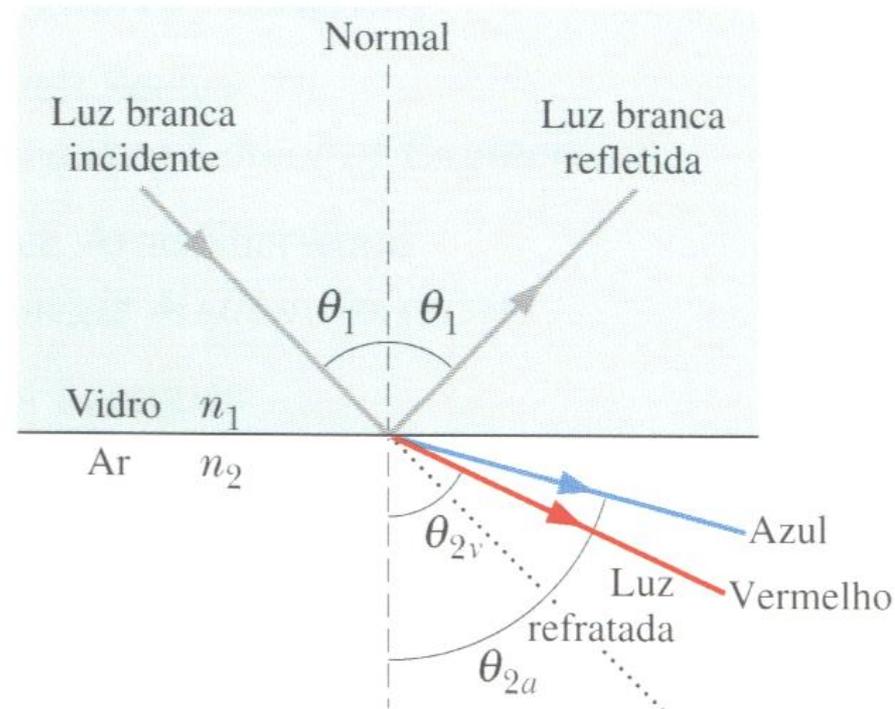
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_k \vec{E}(k) \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

Luz branca

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



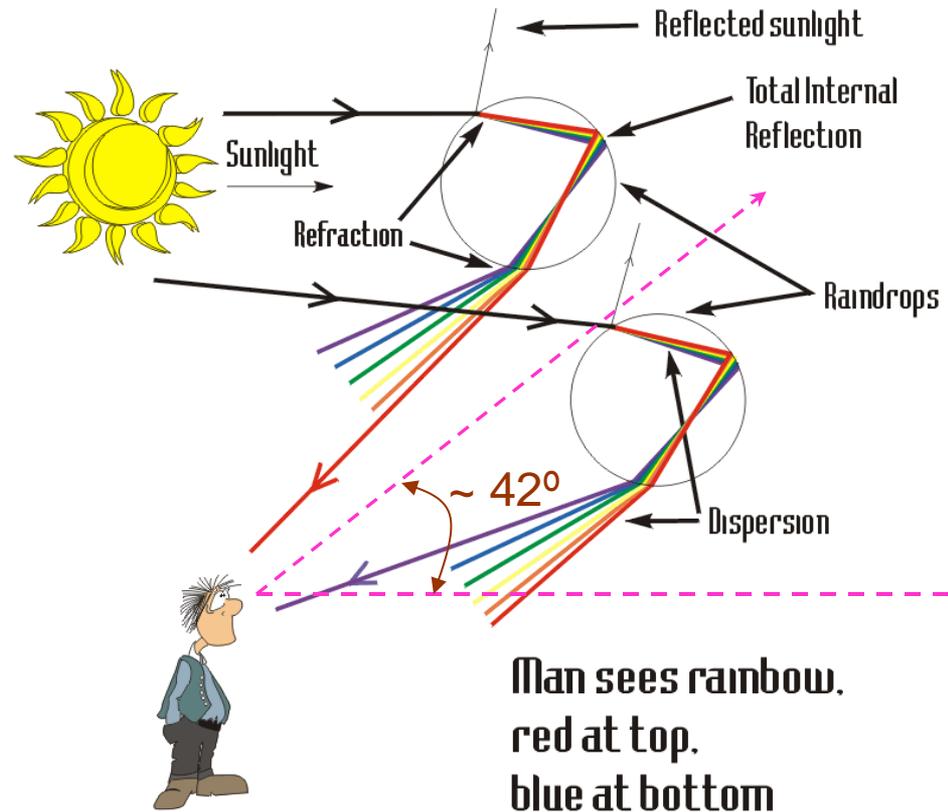
(a)



(b)

Ondas eletromagnéticas

Dispersão cromática: Formação do arco-íris



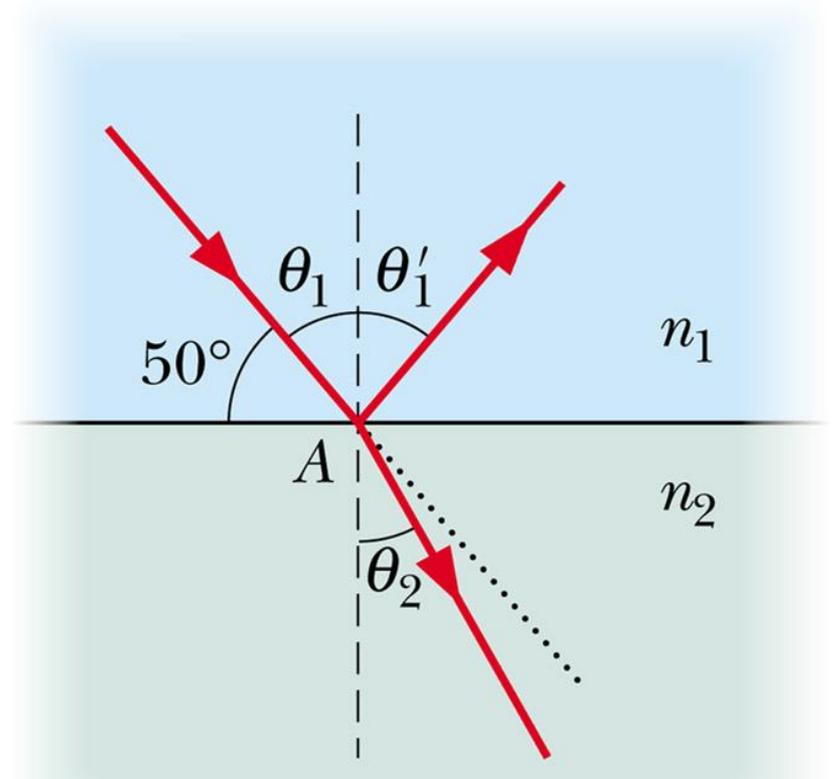
Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

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):

$$\theta_1' = 40^\circ \quad \text{e} \quad \theta_2 = 28,88^\circ$$



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.

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

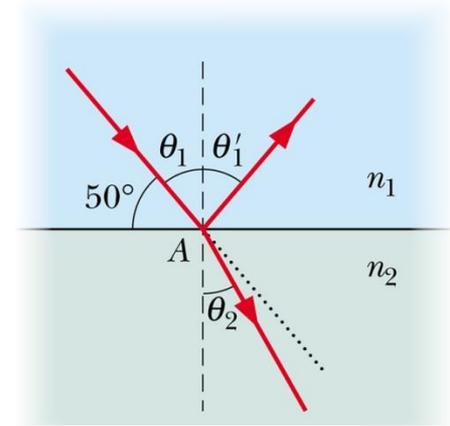
Cálculos:

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

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

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

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

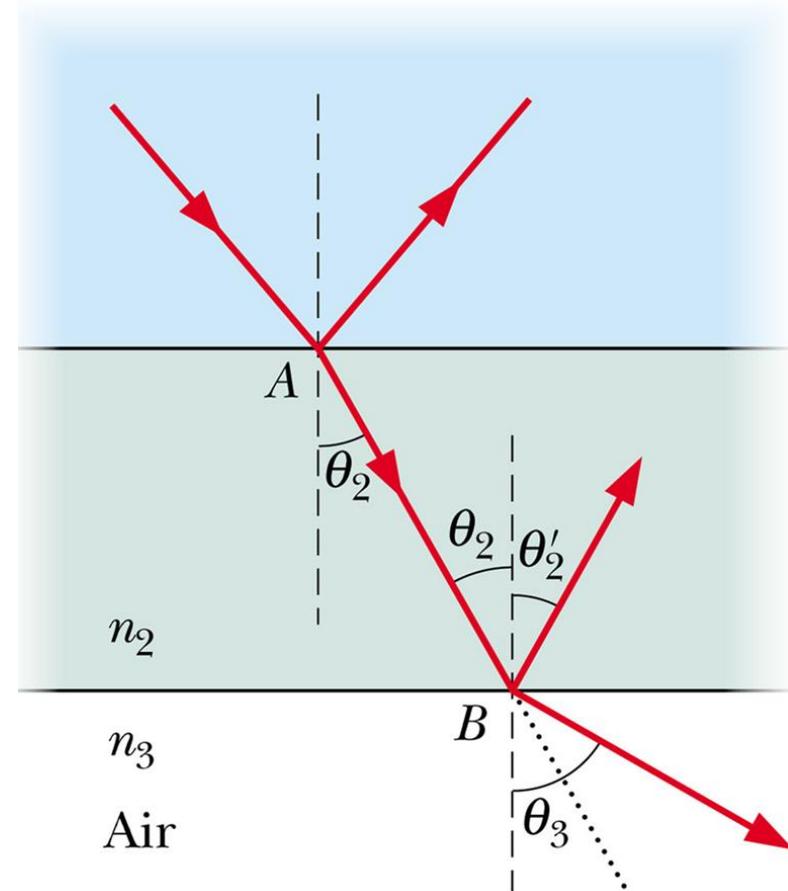


Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

(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):

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



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 $28,88^\circ$.

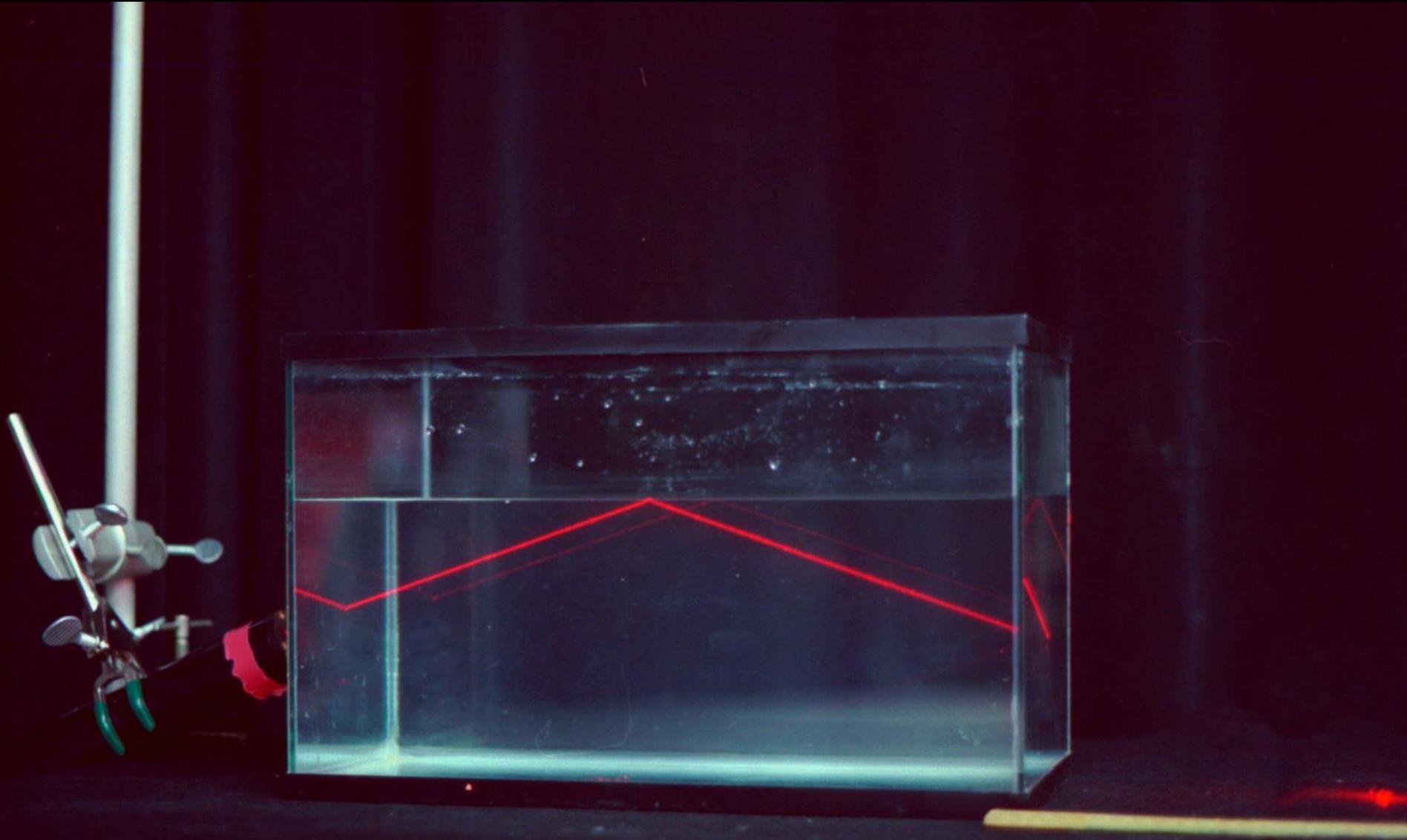
$$n_3 \text{sen} \theta_3 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

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

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

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

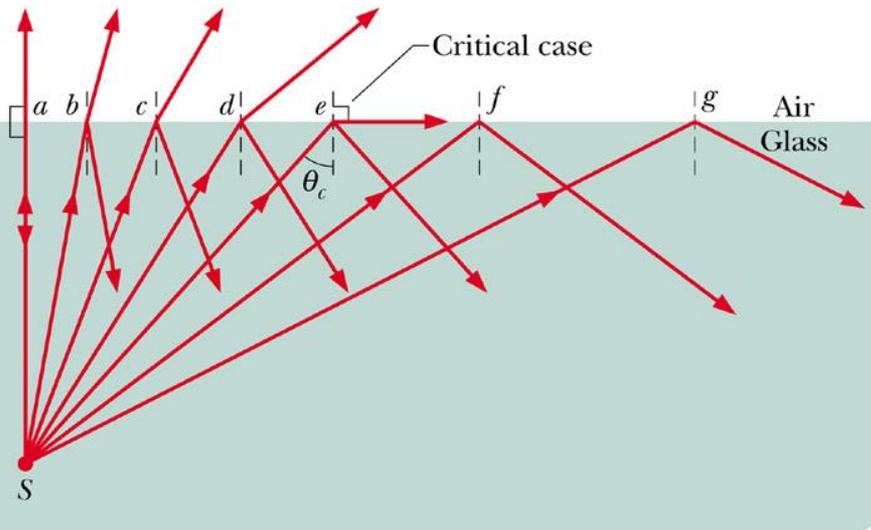
Reflexão Interna Total





Capítulo 33: Ondas Eletromagnéticas

33-9 | Reflexão Interna Total



(a)



(b)

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

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

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

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

Ondas eletromagnéticas

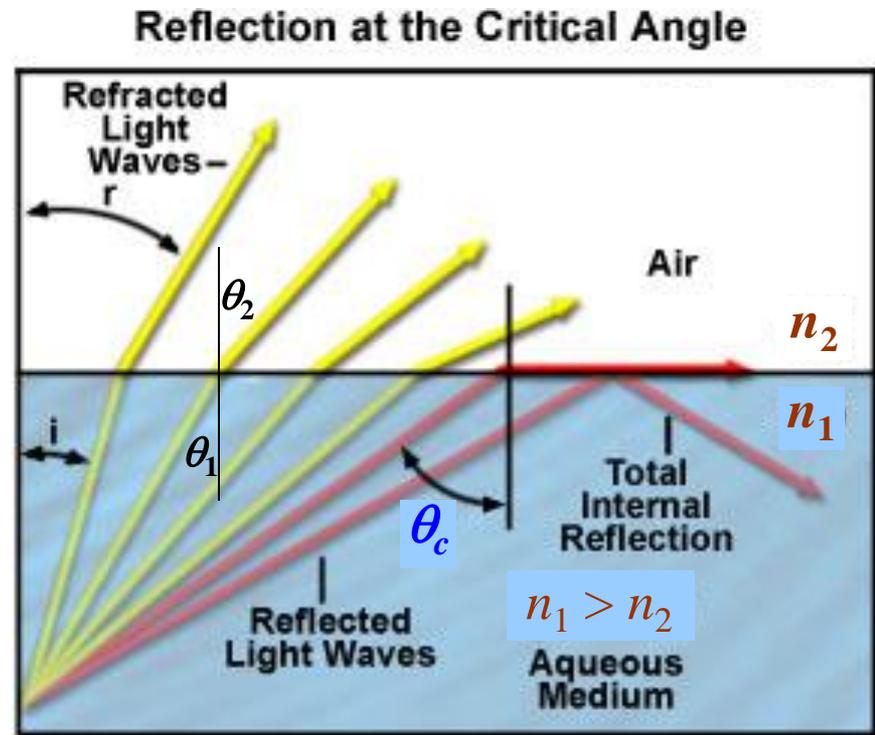
Reflexão interna total

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.

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

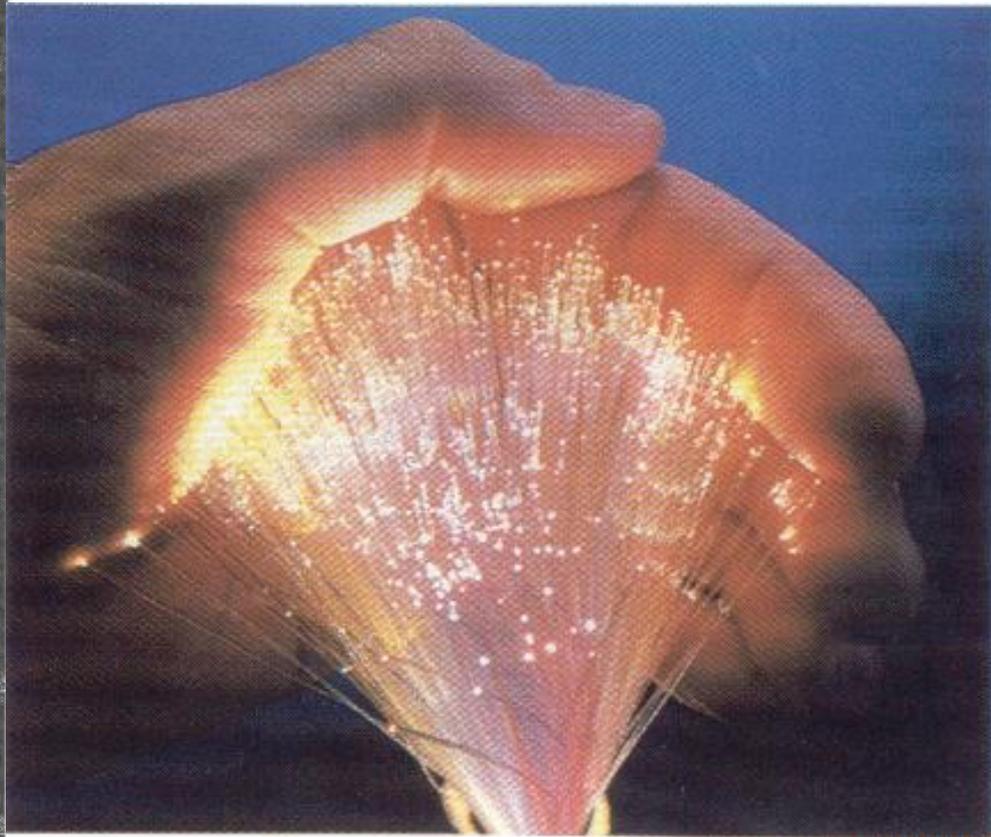
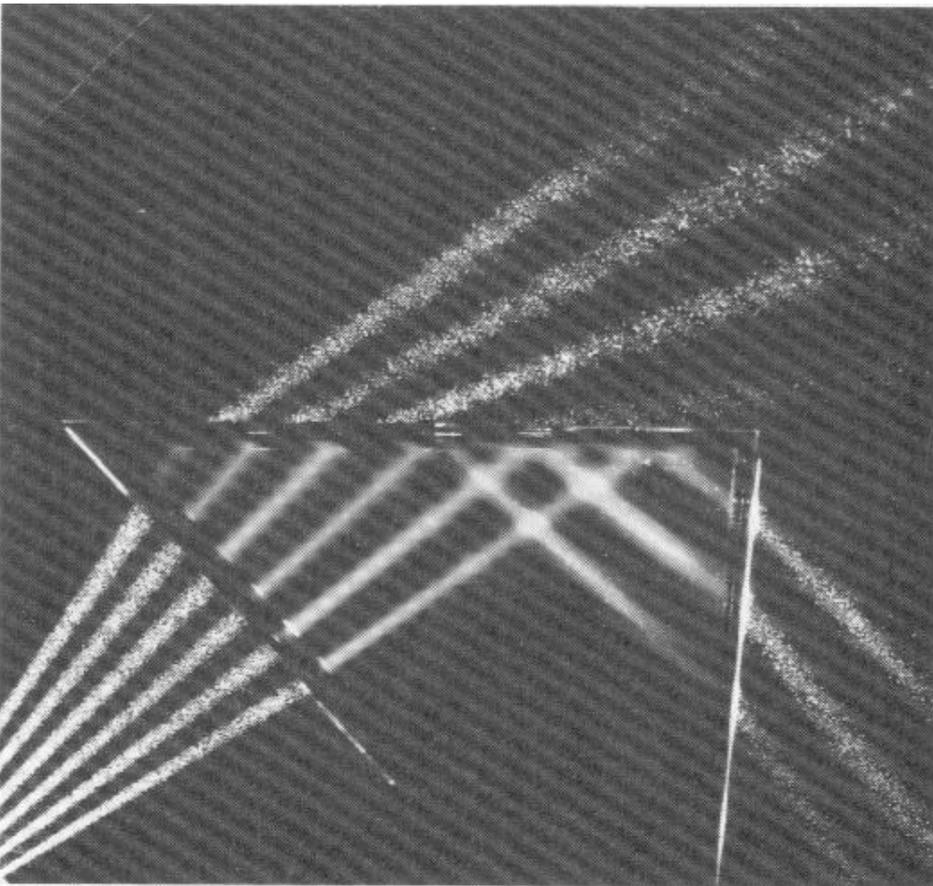
$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \frac{\pi}{2} = n_2$$

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

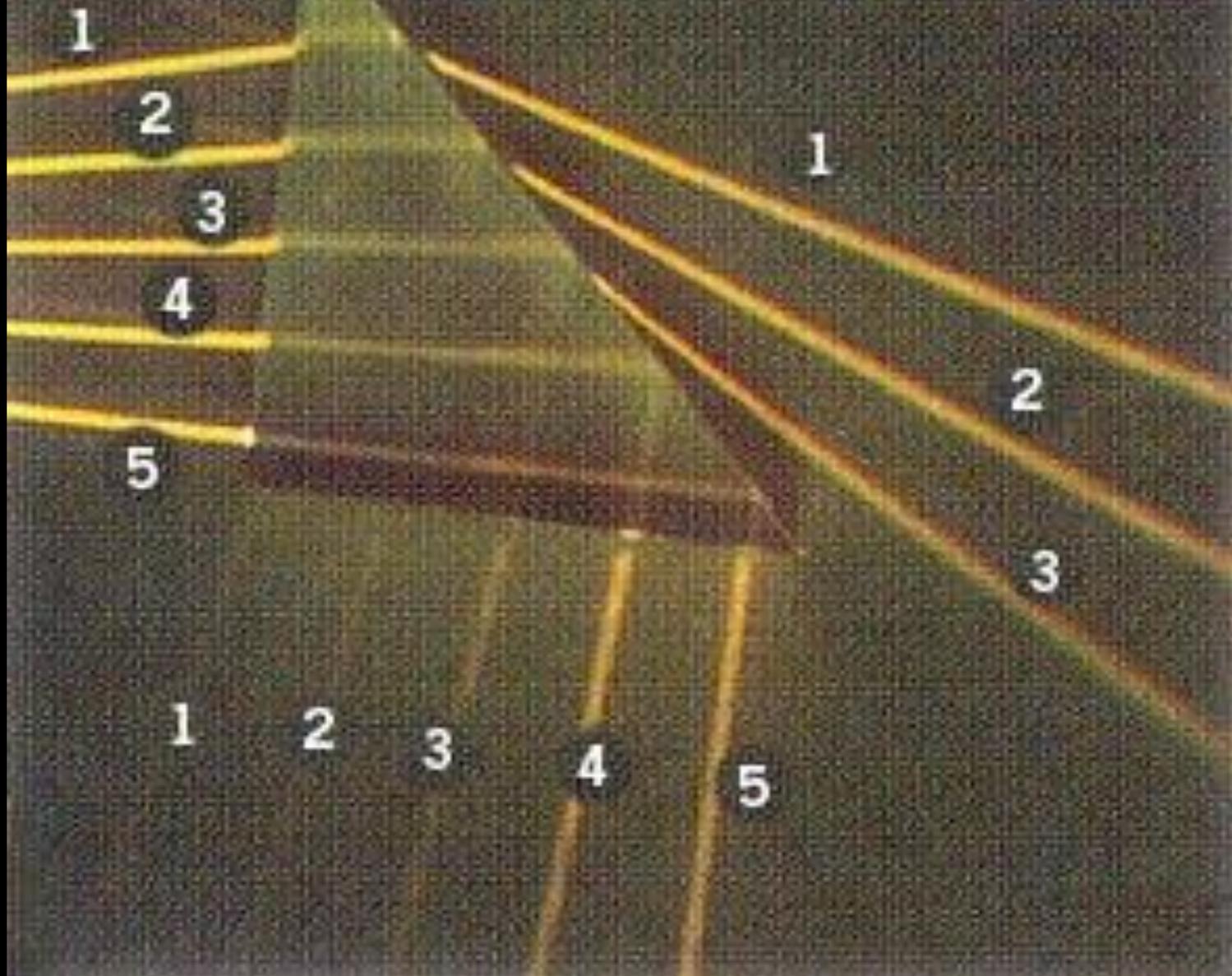


Ondas eletromagnéticas

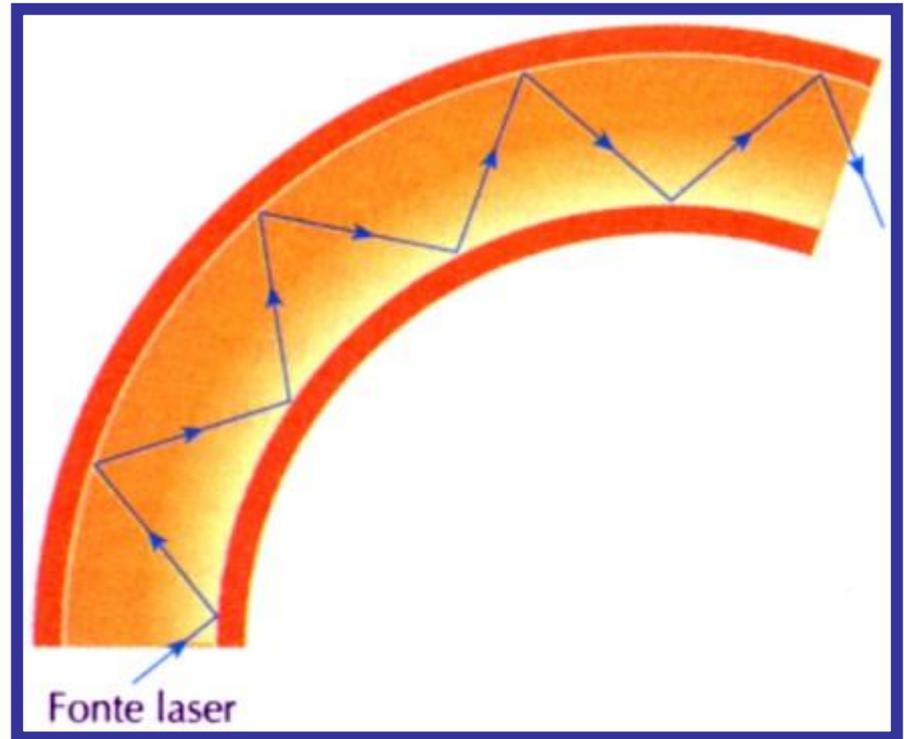
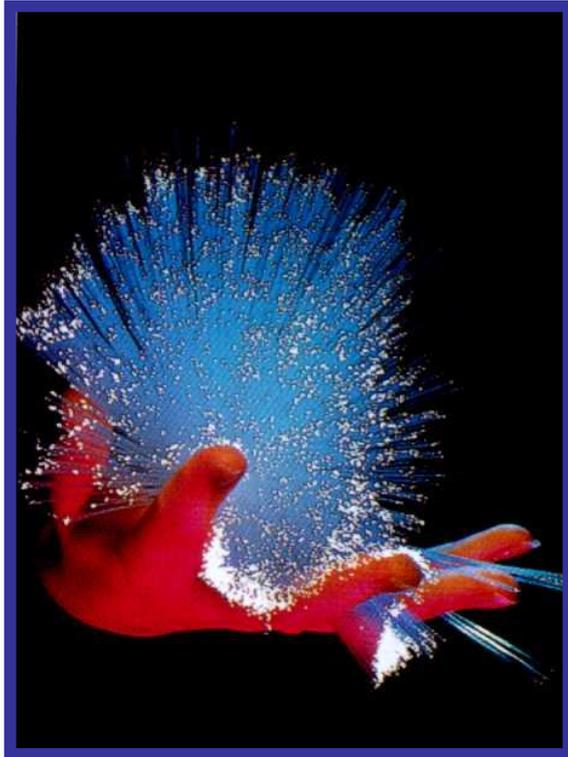
Reflexão interna total: fibras ópticas



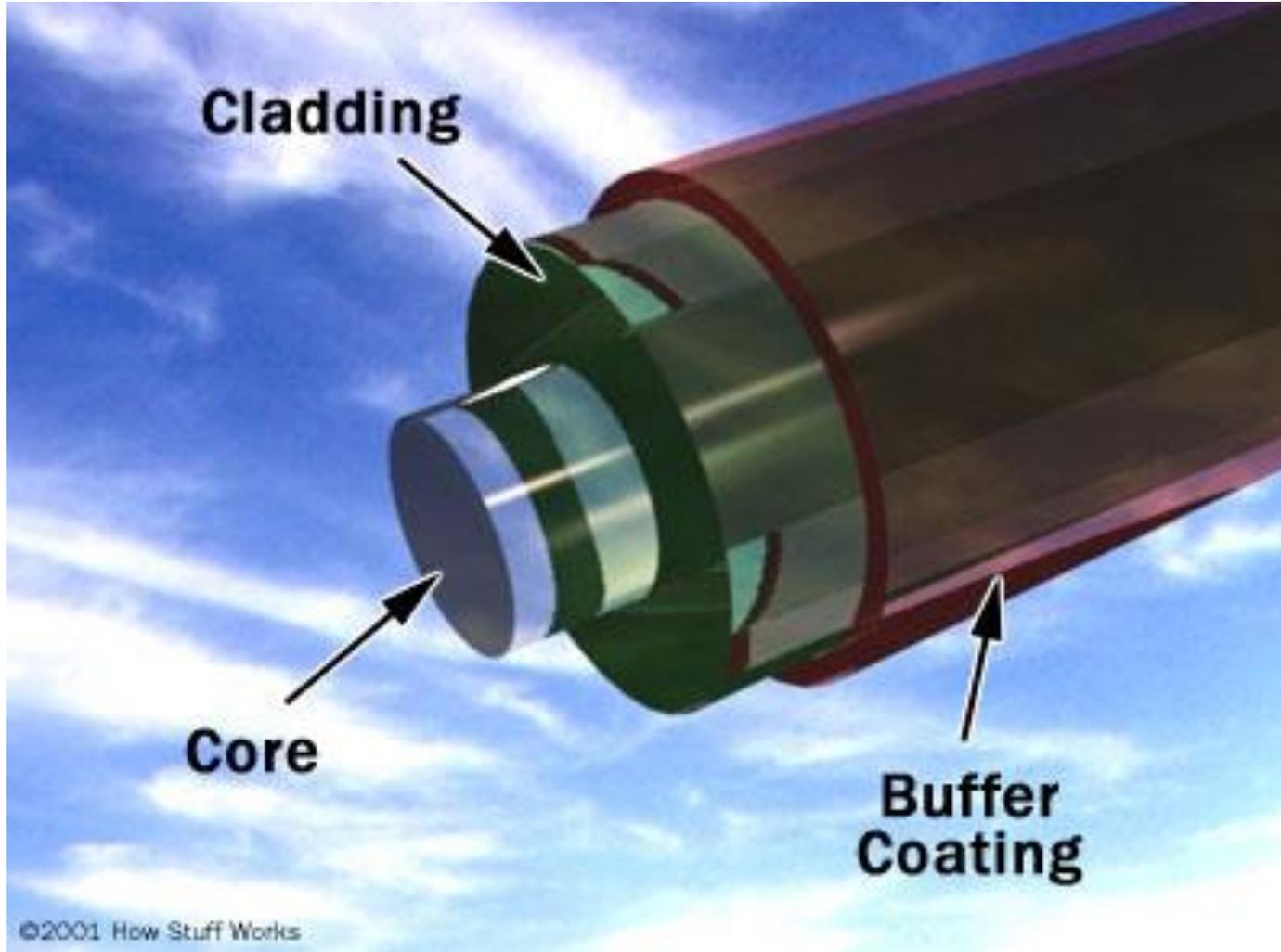
Prism



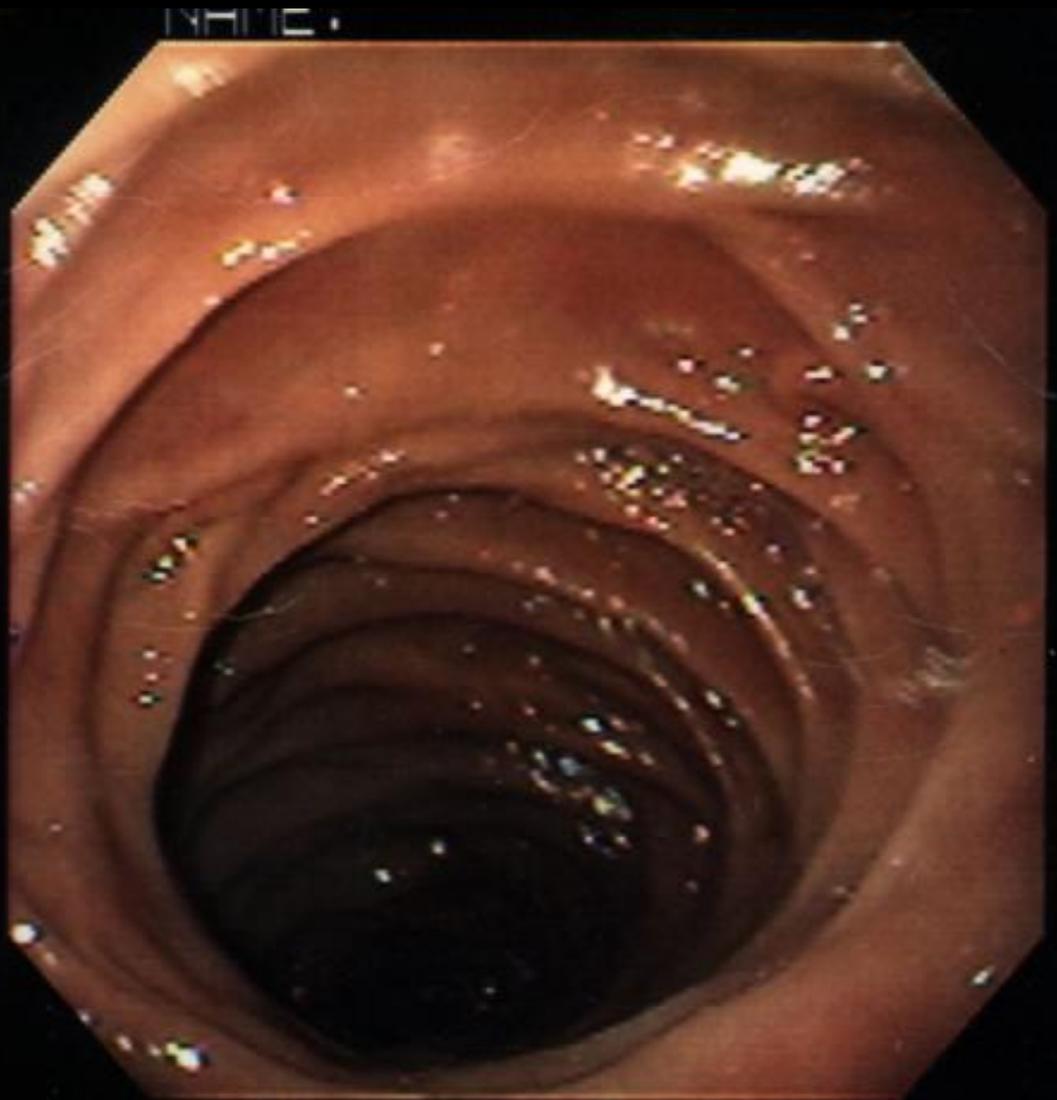
Fibra Ótica

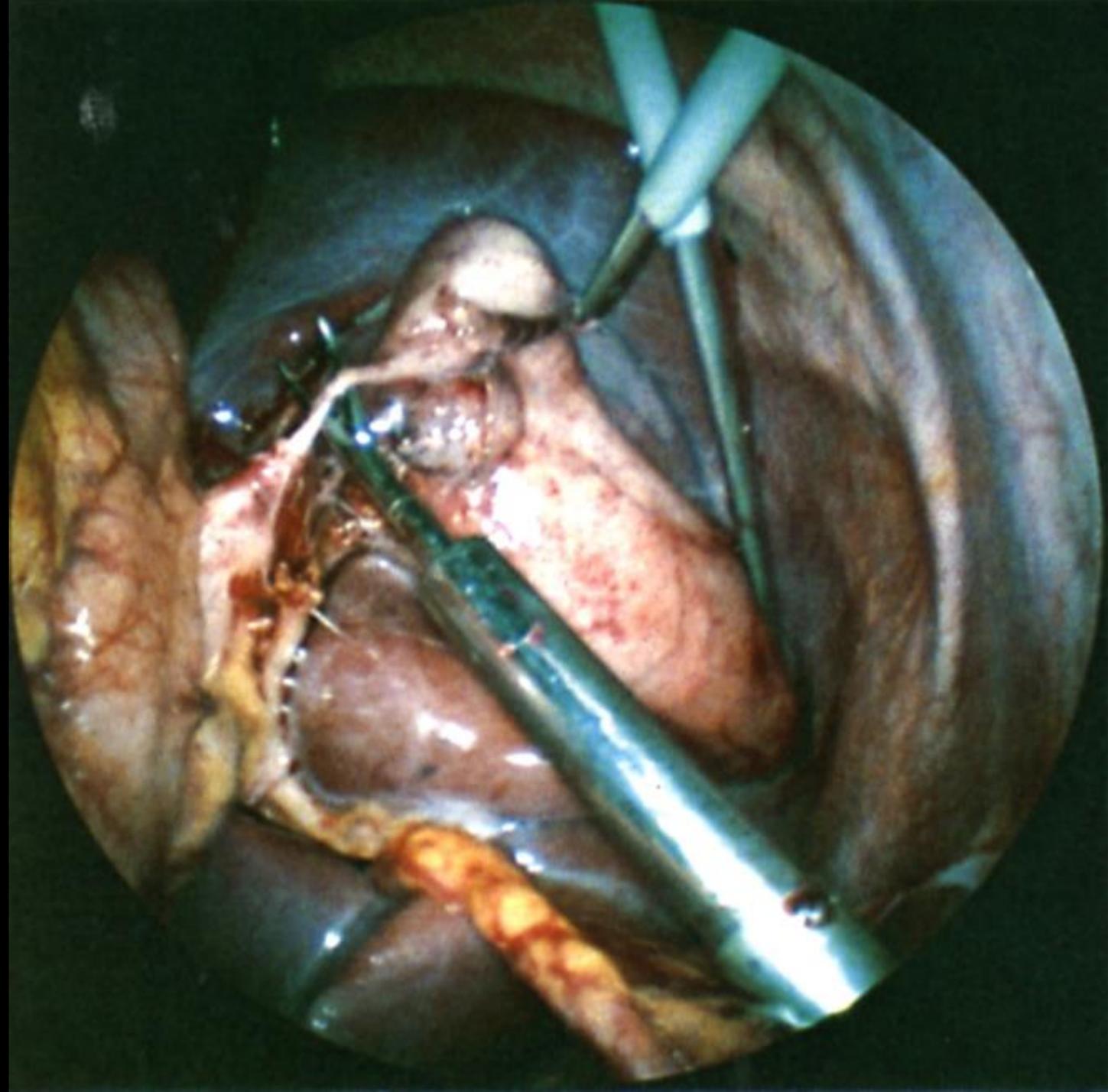


33-9 | Reflexão Interna Total



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





Ondas eletromagnéticas

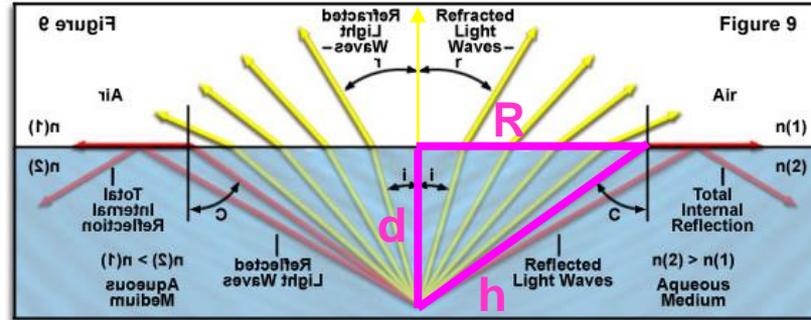
Problema 5

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.

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

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



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

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

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

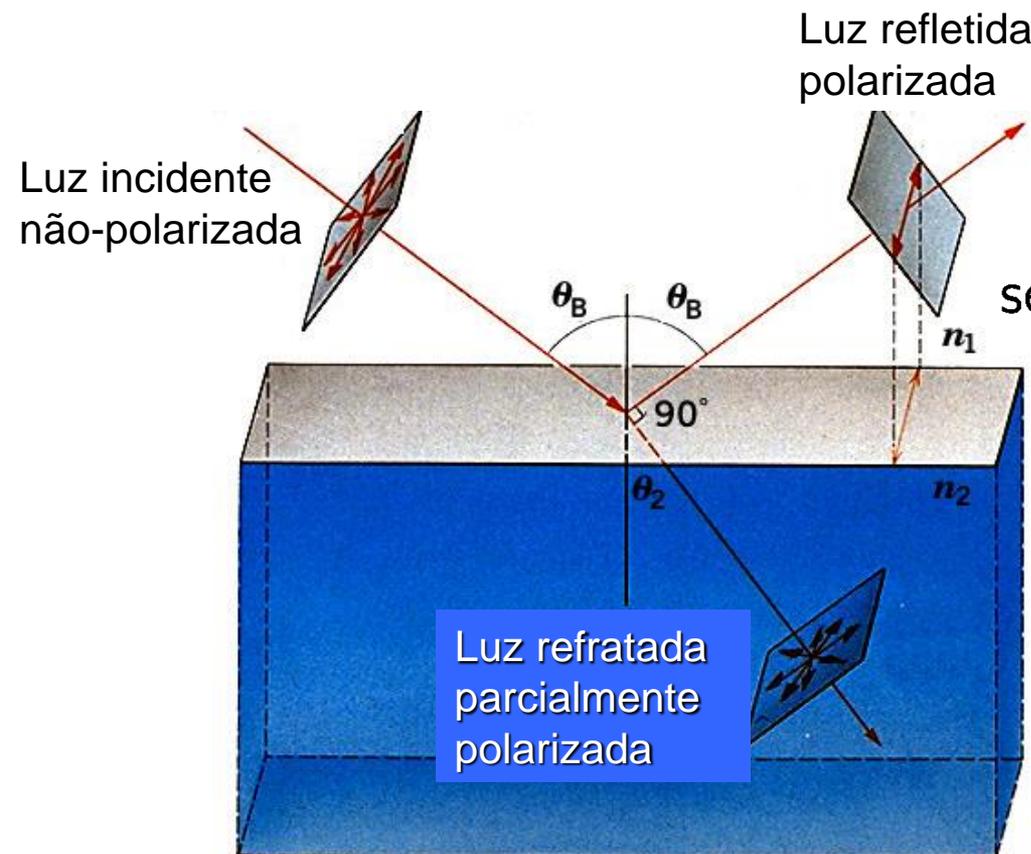
$$R^2 \approx 0,832 \quad \rightarrow \quad R \approx 0,912 \text{ m} ; \quad D = 2R \approx 1,824 \text{ m}$$

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

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

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

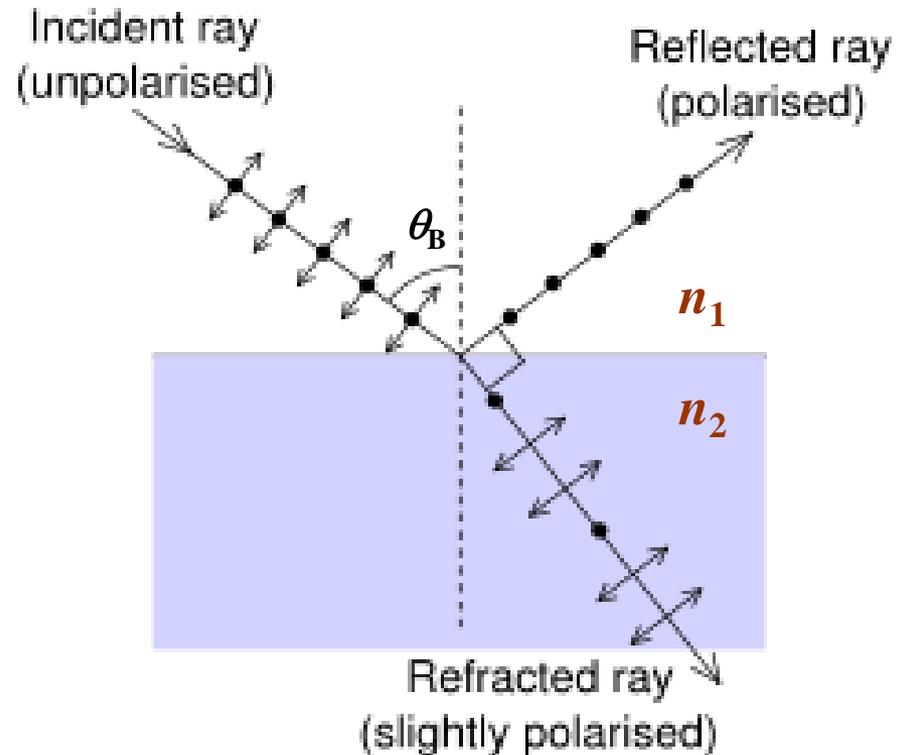
Então

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

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



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



Exemplo de aplicação polarização da luz

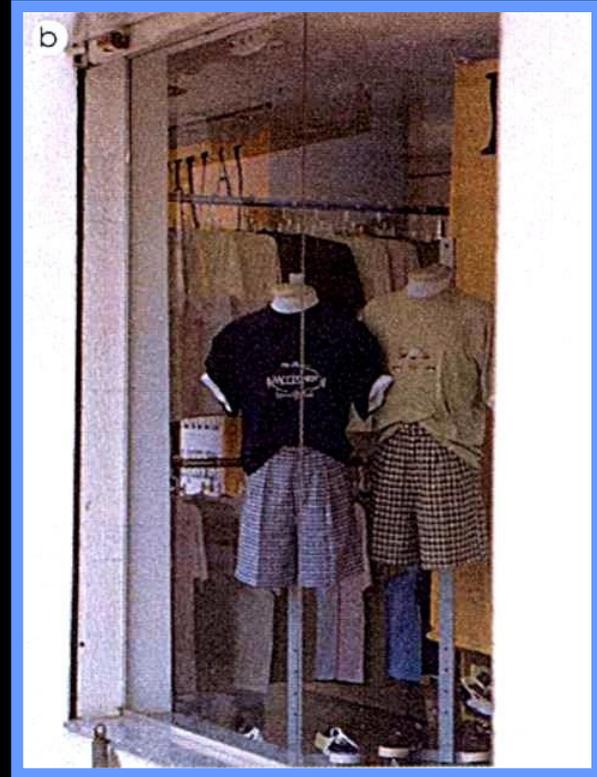
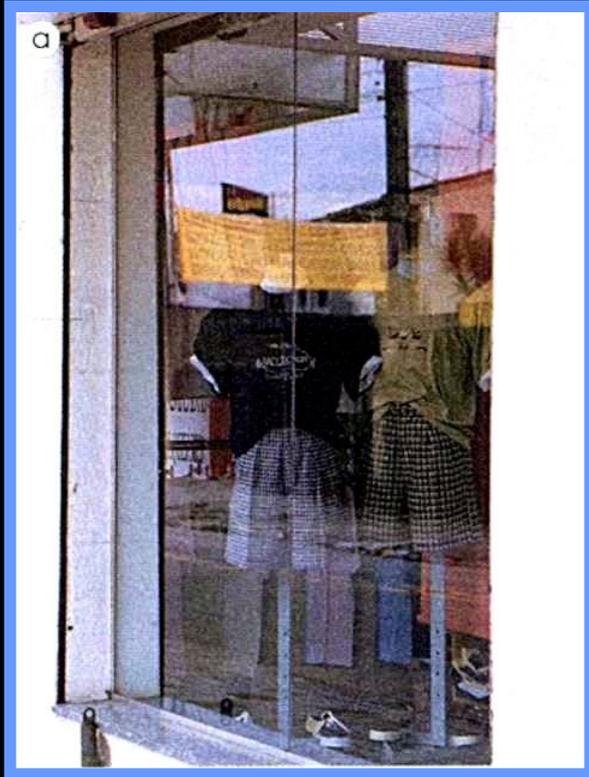


Foto sem lente polarizadora

Foto com lente polarizadora