

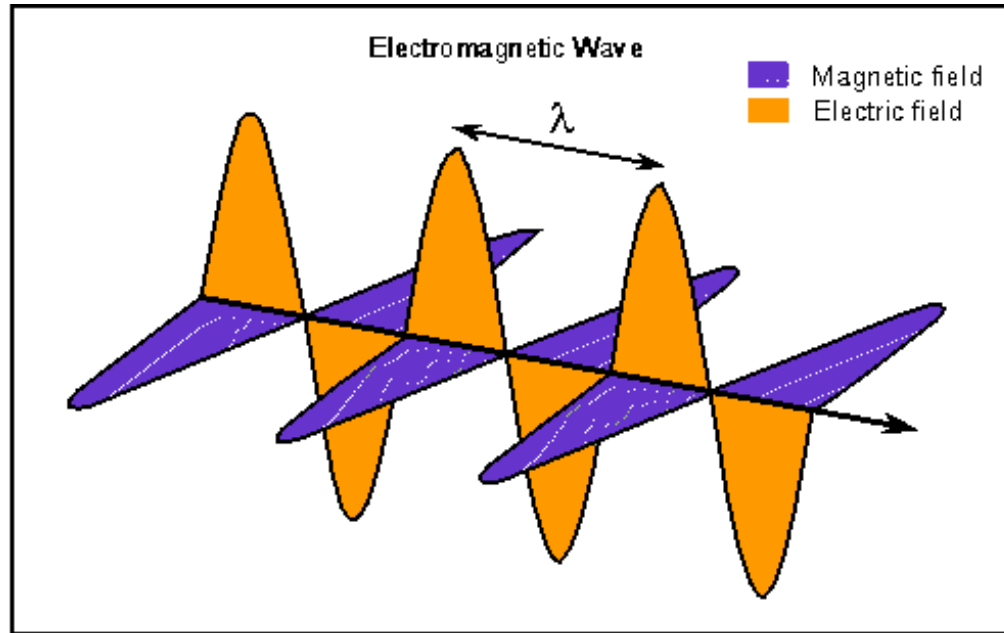
Universidade Federal do ABC

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

REFLEXÃO, REFRAÇÃO, DIFRAÇÃO, INTERFERÊNCIA E RESSONÂNCIA

O conhecimento das propriedades da luz nos permite explicar por que o céu é azul, funcionamento dos olhos, e dispositivos tais como telescópio, microscópios, câmaras e óculos. Além de lasers, fibra óptica, imagens médicas, etc.

ONDA ELETROMAGNÉTICA



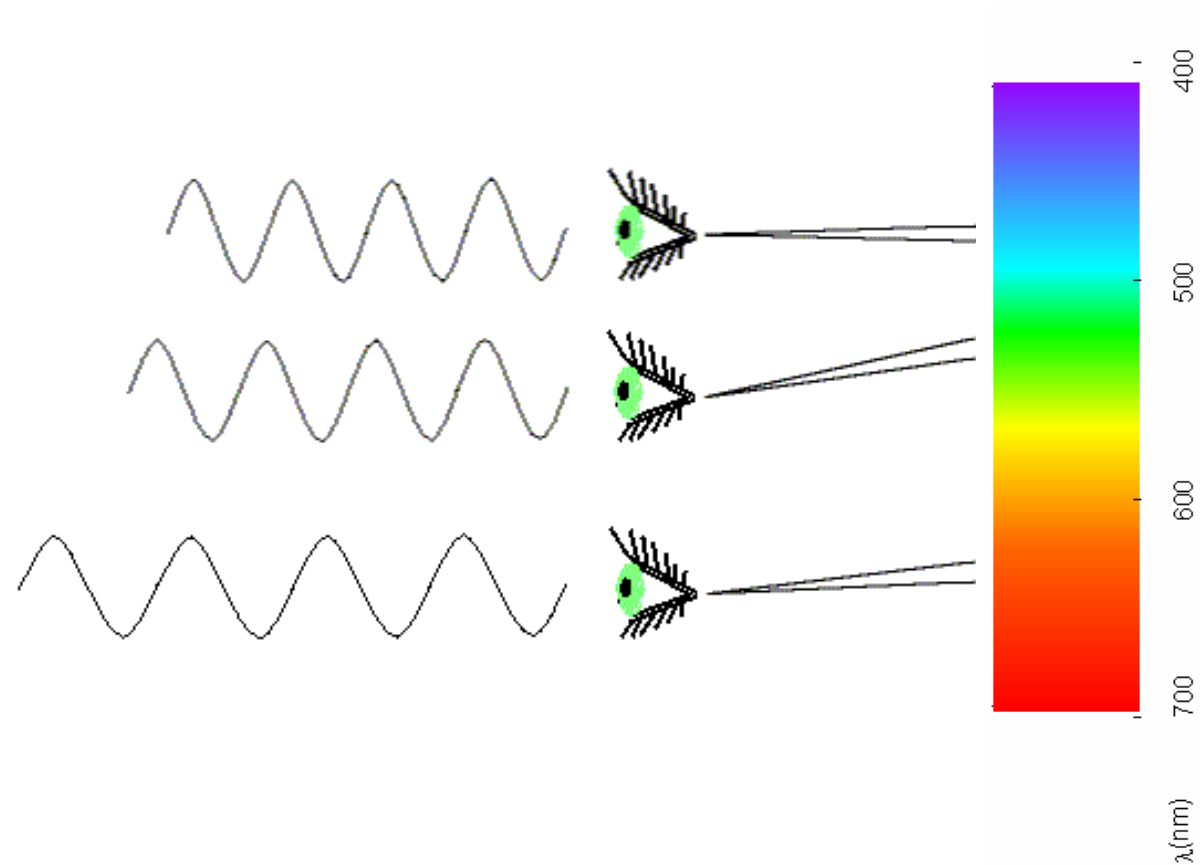
Maxwell e Hertz (1887) mostram que a luz é uma onda eletromagnética: campos elétricos e magnéticos que oscilam em fase e se movimentam a uma velocidade equivalente à da luz

Propriedades comuns a todas as ondas eletromagnéticas:

- São transversais: E e B são perpendiculares entre si e à direção do movimento
- A razão entre os campos elétrico e magnético tem uma grandeza fixa dada por:

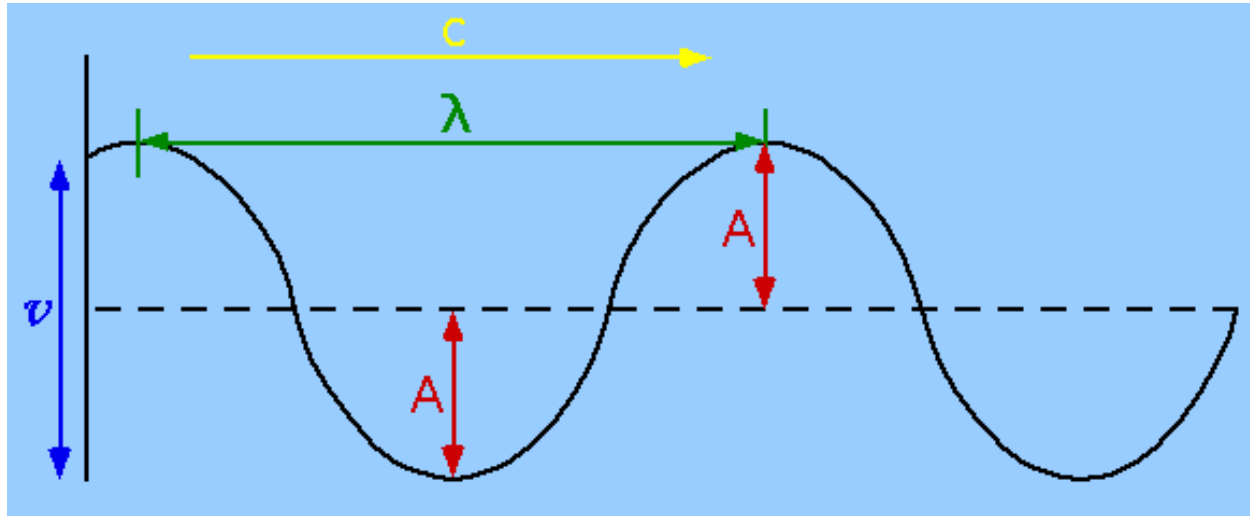
$$\frac{E}{B} = c$$

PROPRIEDADES



Um aquecedor elétrico emite basicamente ondas infravermelhas. No entanto, quando sua temperatura está suficientemente elevada, ele também emite uma quantidade substancial de luz vermelha.

PROPRIEDADES



$\lambda \rightarrow$ comprimento de onda $c \rightarrow$ velocidade
 $f \rightarrow$ frequência $\tau \rightarrow$ período $A \rightarrow$ amplitude
 $\omega \rightarrow$ frequência angular $k \rightarrow$ número de onda

Função de onda

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\lambda \cdot f = c$$

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen} \left[2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$$

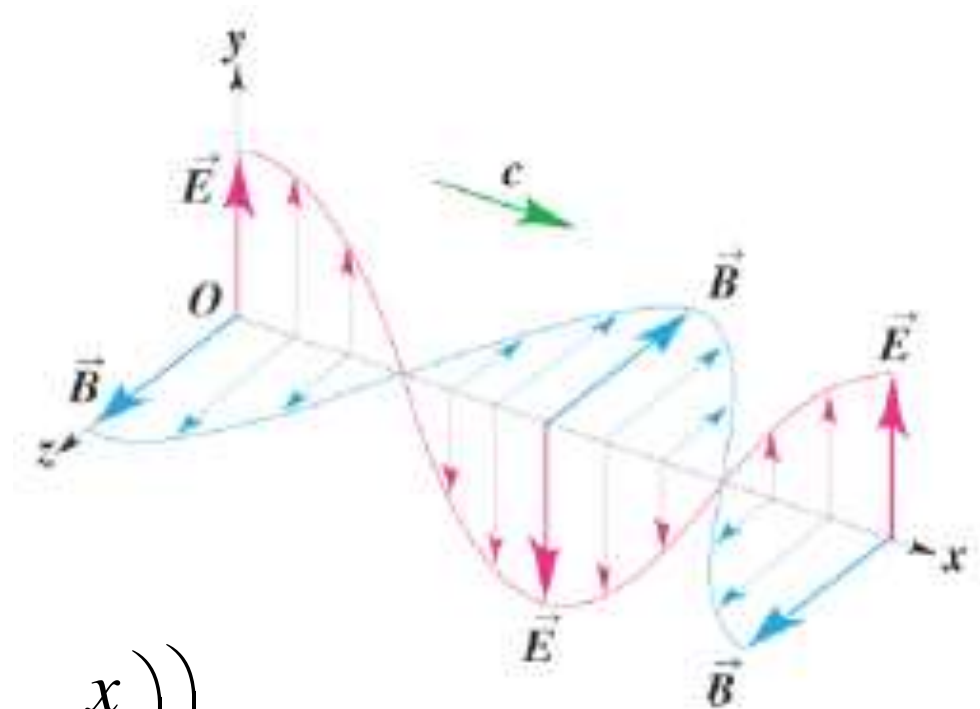
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$f = \frac{1}{\tau}$$

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(\omega t - kx)$$

Campos elétricos e magnéticos

Exemplo de solução da equação de onda para uma onda senoidal:

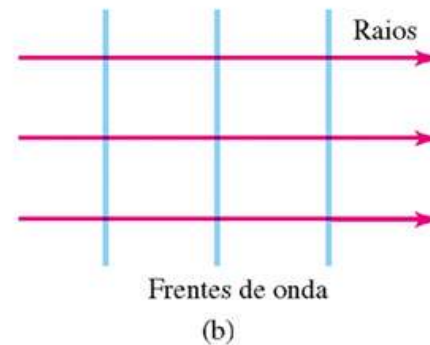
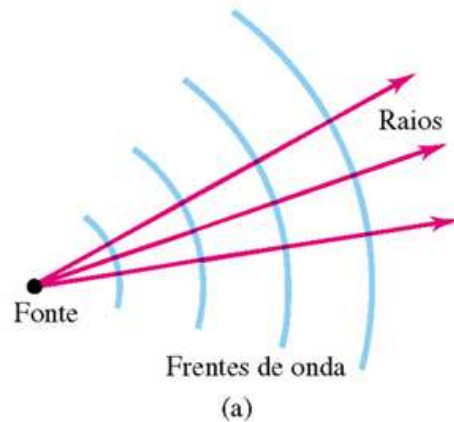
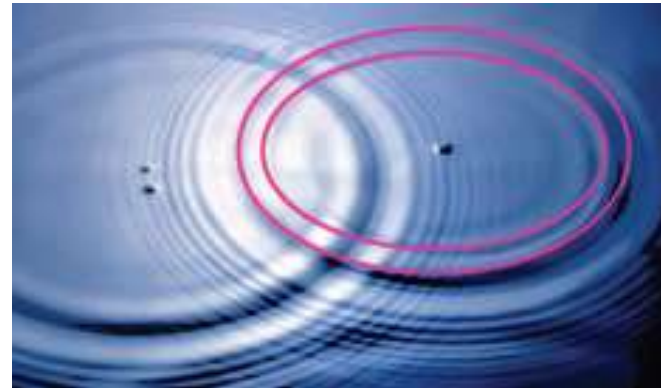
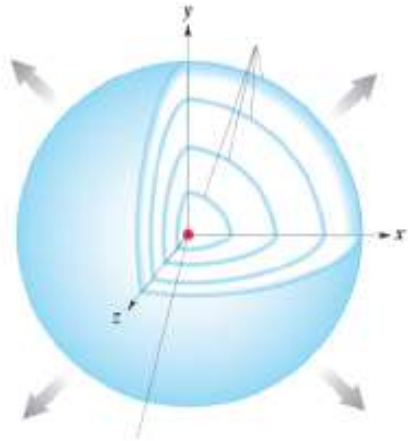


$$E(x, t) = E_{\max} \cdot \text{sen} \left(2\pi \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right) \right)$$

$$B(x, t) = B_{\max} \cdot \text{sen} \left(2\pi \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right) \right)$$

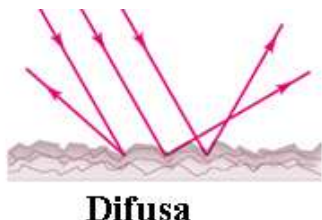
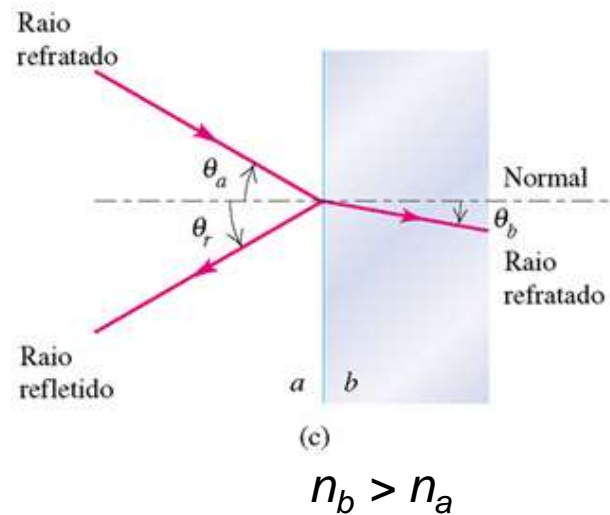
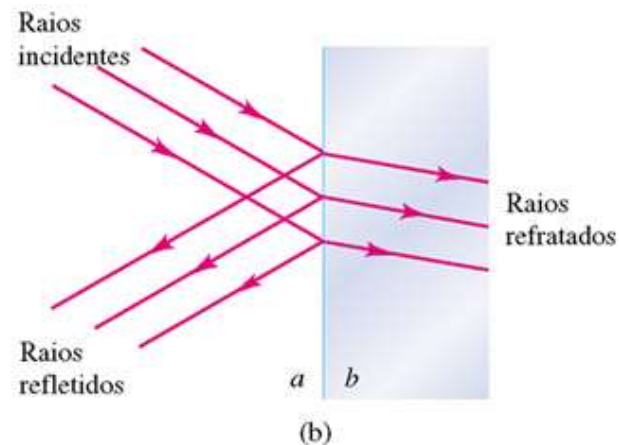
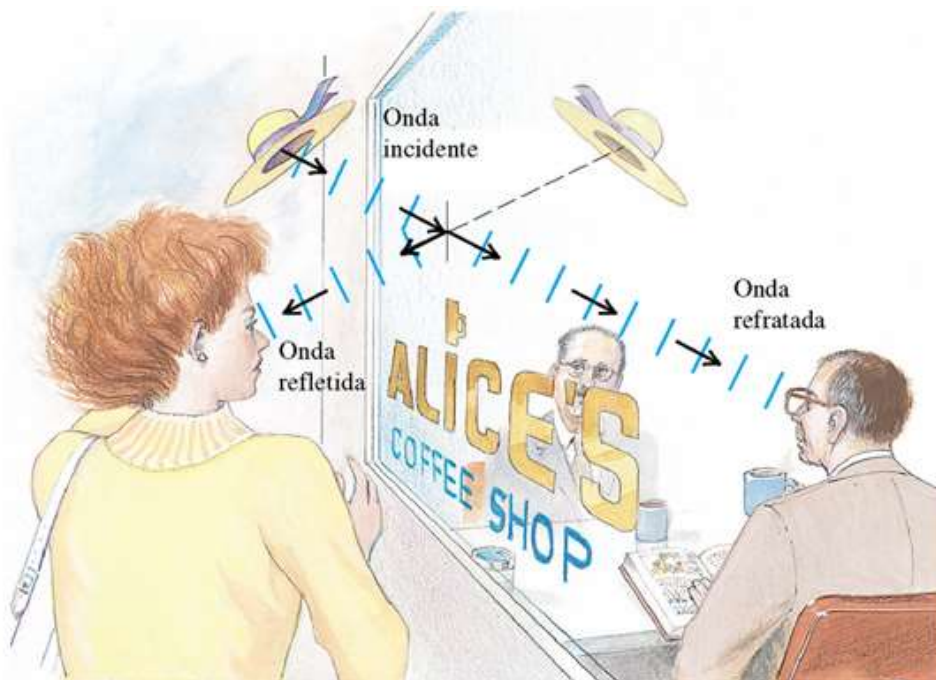
PROPAGAÇÃO

Frente de onda: *lugar geométrico de todos os pontos adjacentes que possuem a mesma fase da vibração de uma grandeza física associada com a onda.*



REFLEXÃO E REFRAÇÃO

Quando uma onda atinge uma superfície separando dois meios, ela é parcialmente refletida e parcialmente refratada.



LEIS DA REFLEXÃO E DA REFRAÇÃO

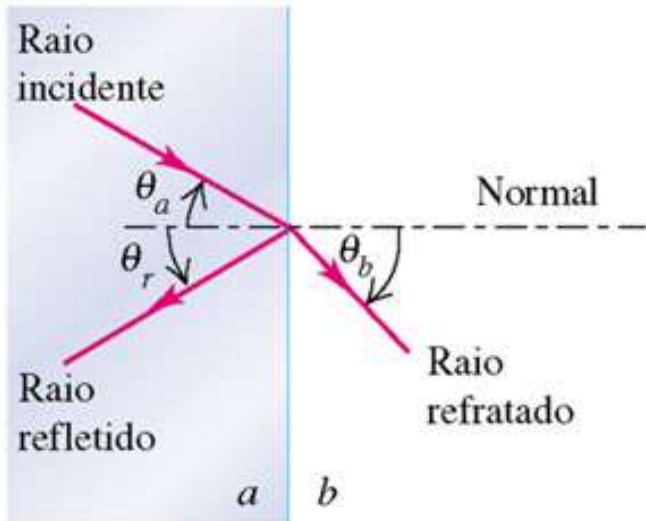
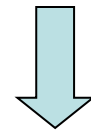


FIGURA 34.5 Reflexão e refração quando o material b possui índice de refração menor do que o índice de refração do material a , ou seja $n_b < n_a$. O ângulo de refração θ_b é maior do que ângulo de incidência θ_a . Compare com a Figura 34.3c, que mostra a situação para $n_b > n_a$.

O raio incidente, o raio refletido, o raio refratado e a normal à superfície estão todos sobre o mesmo plano.

O ângulo de reflexão é igual ao de incidência para todos os comprimentos de onda e para qualquer par de materiais.



Lei da reflexão

$$\theta_r = \theta_a$$

LEI DE SNELL DA REFRAÇÃO



**Willebrord Snell
(1580-1626)**

Quando um raio de luz monocromática atravessa a interface entre dois dados materiais a e b, os ângulos θ_a e θ_b estão relacionados aos índices de refração de a e b por:

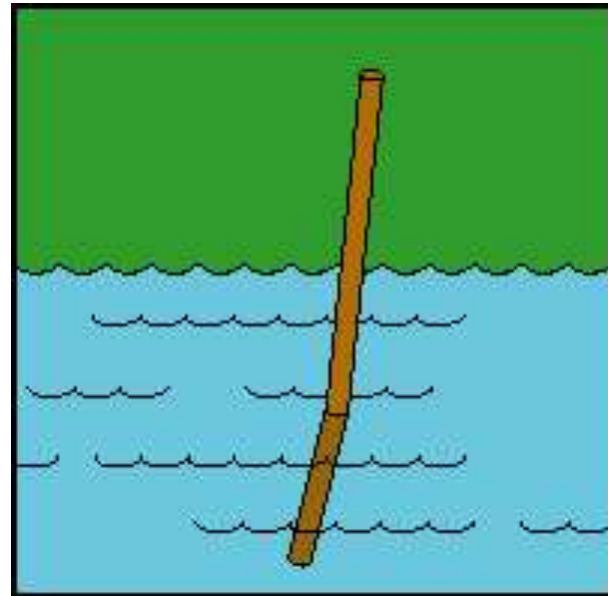
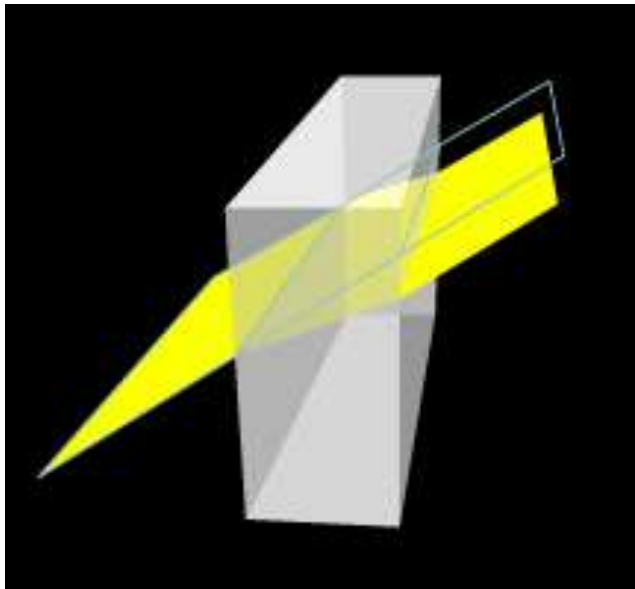
$$\frac{\text{sen } \theta_a}{\text{sen } \theta_b} = \frac{n_b}{n_a}$$

ÍNDICE DE REFRAÇÃO

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

c = velocidade da luz no vácuo

v = velocidade da luz através de outro meio



Dependência do tipo de material e do comprimento de onda da radiação

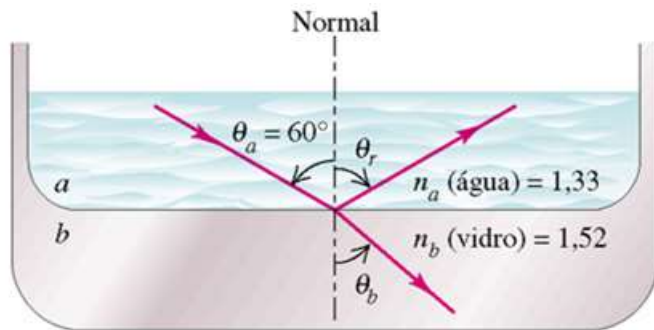
ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Al	Cu	Au	Ag	PC	PMMA	Vidro Flint (71% Pb)	Whisky
1,39	1,10	0,47	1,35	1,586	1,488	1,805	1,356

Dependência do tipo de material e do comprimento de onda da radiação

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

← Comprimento de onda no vácuo!

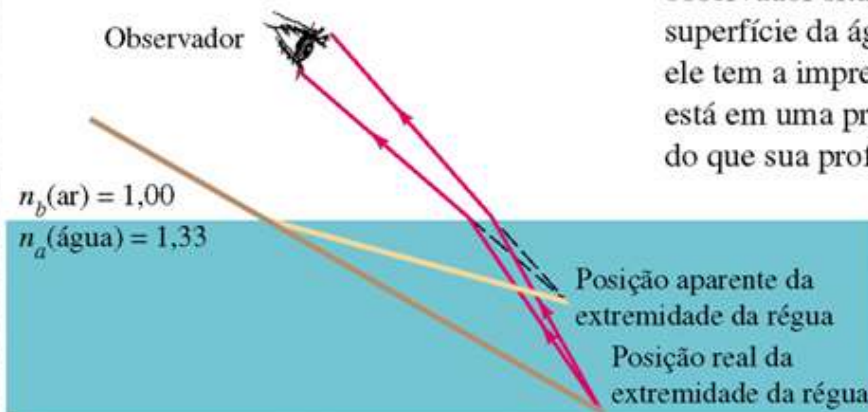


Reflexão e refração da luz passando da água para o vidro.

FIGURA 34.6 (a) A régua é certamente retilínea, contudo parece que ela se entorta ao penetrar na água. (b) Os raios de luz provenientes de um objeto submerso se desviam para fora da normal quando eles emergem no ar. Quando um observador situado acima da superfície da água olha para baixo, ele tem a impressão de que o objeto está em uma profundidade menor do que sua profundidade real.



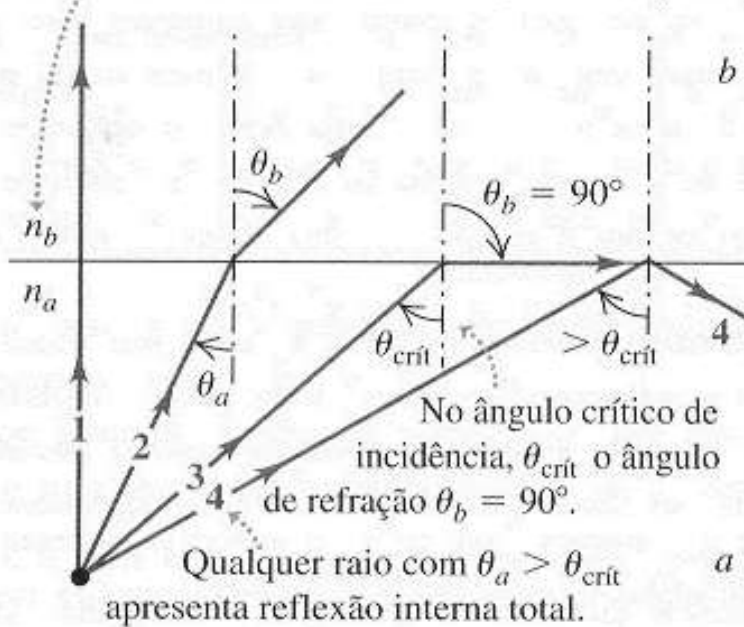
(a)



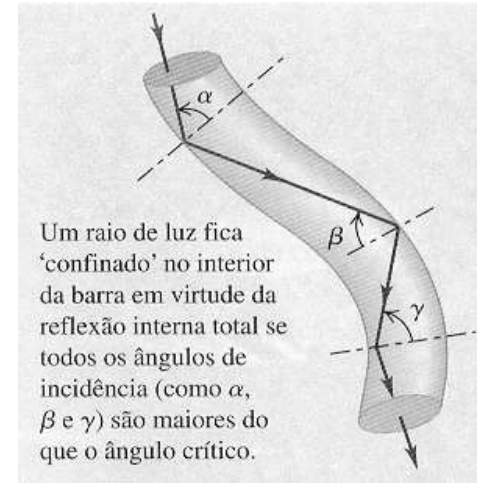
(b)

REFLEXÃO INTERNA TOTAL

A reflexão interna total ocorre apenas se $n_b < n_a$.



EXEMPLO: FIBRA ÓPTICA

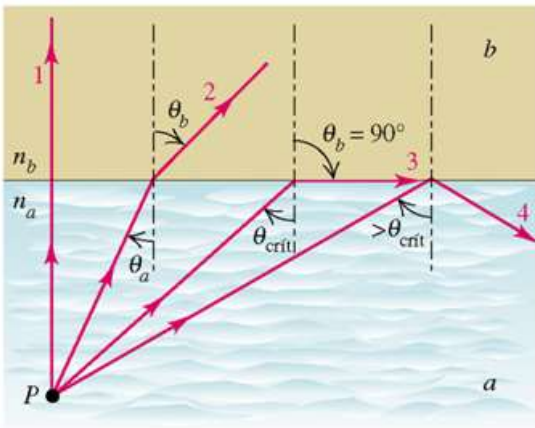


$$\text{sen } \theta_{\text{crit}} = \frac{n_b}{n_a}$$

EXEMPLO: DIAMANTE LAPIDADO

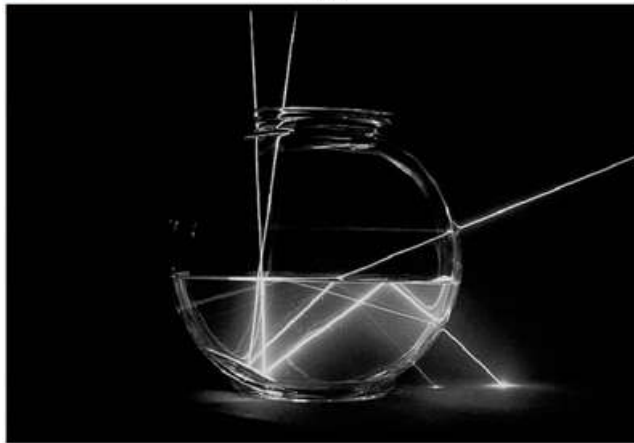


Exemplo: vidro-ar sabendo que para o vidro $n = 1,52$, encontre o ângulo crítico?



(a)

FIGURA 34.9 (a) Reflexão interna total. O ângulo de incidência para o qual o ângulo de refração é igual a 90° denomina-se ângulo crítico; isso ocorre no caso do raio 3. Para maior clareza, as partes refletidas dos raios 1, 2 e 3 não são indicadas. (b) Raios provenientes de um laser do fundo de um aquário que incidem sobre a superfície da água de baixo para cima; eles são refletidos para baixo por espelhos inclinados em ângulos diferentes, porém um raio sofre reflexão interna total na interface ar-água.



(b)

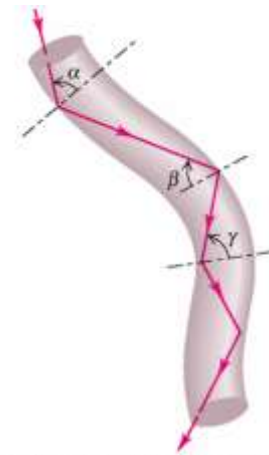


FIGURA 34.11 Uma barra transparente cujo índice de refração é maior do que o índice de refração do material em seu exterior. Um raio de luz fica “confinado” no interior da barra em virtude da reflexão interna total quando os ângulos indicados são maiores do que o ângulo crítico.

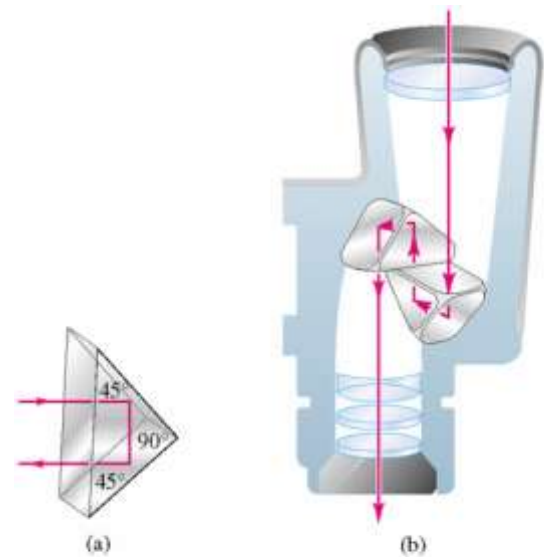


FIGURA 34.10 (a) Reflexão interna total em um prisma de Porro. (b) Uma associação com dois prismas de Porro usada em binóculos.

DISPERSÃO

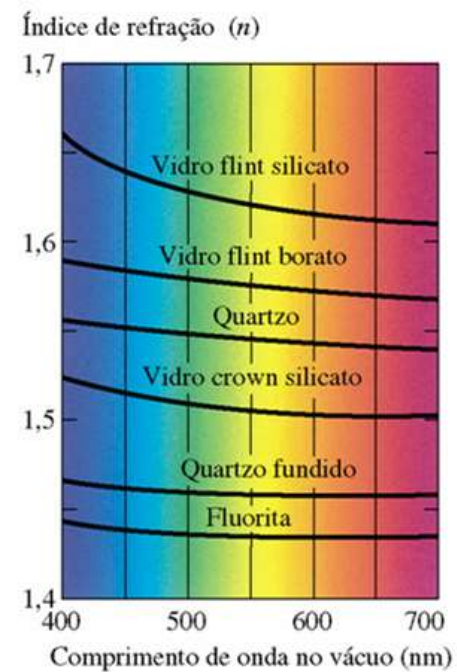
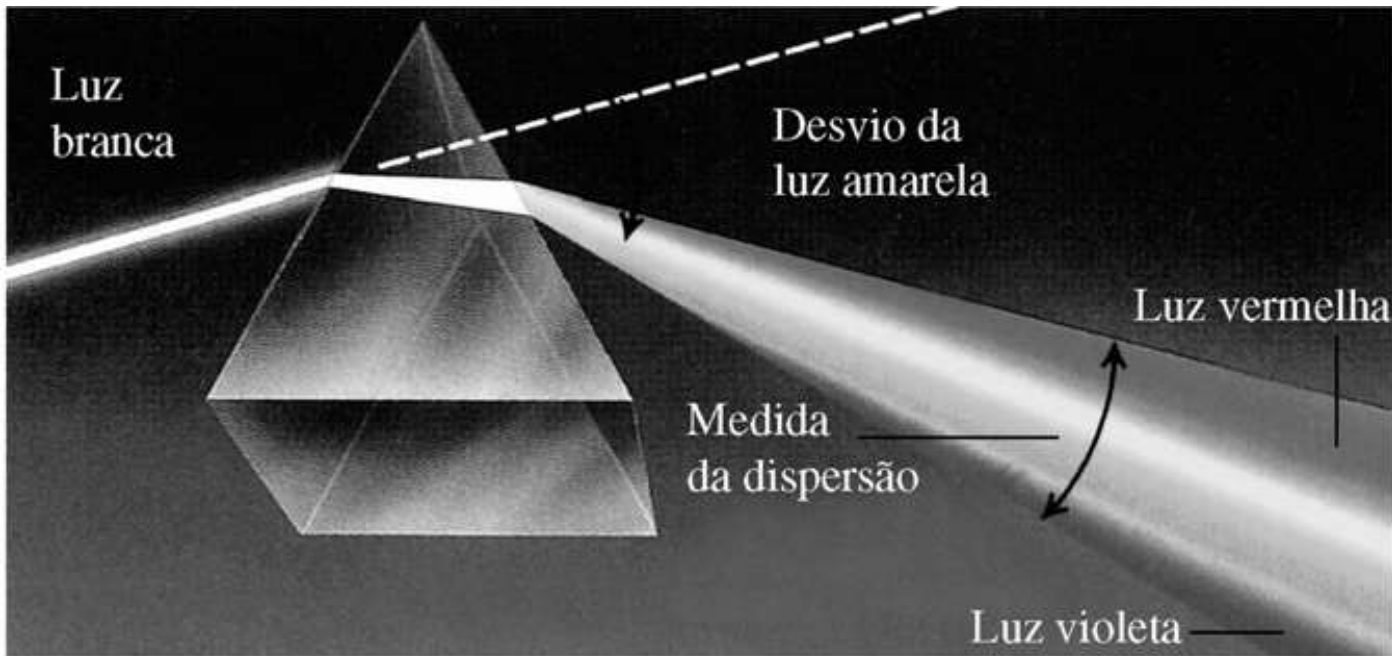


FIGURA 34.13 Variação do índice de refração n em função do comprimento de onda para alguns materiais transparentes. O eixo horizontal mostra o comprimento de onda λ_0 da luz *no vácuo*; o comprimento de onda no material é dado por $\lambda = \lambda_0/n$.

O índice de refração de um material depende do comprimento de onda. A dispersão indica como a velocidade da onda e o índice de refração dependem do comprimento de onda.



DISPERSÃO

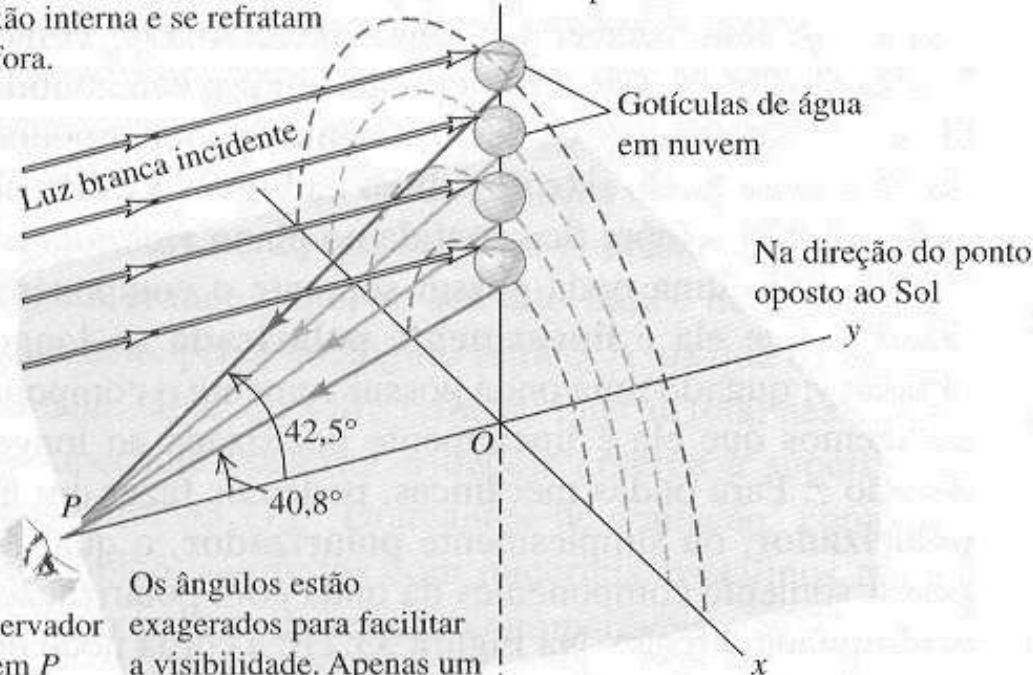
Ao apreciar a beleza de um arco-íris, você está vendo efeitos combinados de dispersão, refração e reflexão. O sol está atrás do observador, e a luz se refrata para o interior de uma gotícula de água; a seguir ela é parcialmente refletida na parte interna posterior da gotícula e finalmente refratada, saindo da gotícula.



O Sol nesta ilustração está diretamente atrás do observador em P .

Os raios do Sol que formam o arco-íris primário se refratam para dentro das gotas, passam por reflexão interna e se refratam para fora.

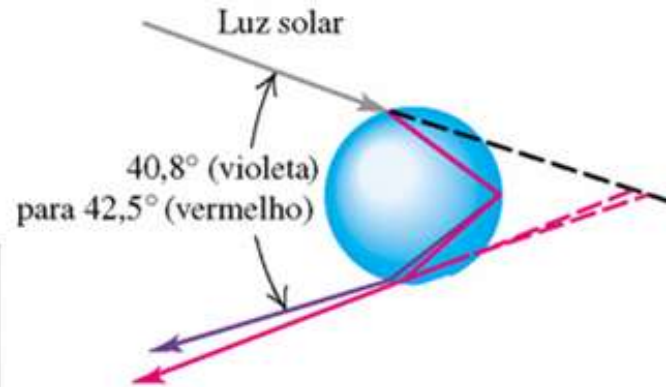
As duas refrações dispersam as cores.



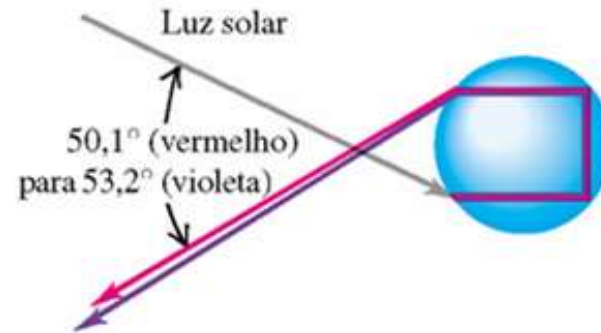
Os ângulos estão exagerados para facilitar a visibilidade. Apenas um arco-íris primário é mostrado.



(c)



(a)

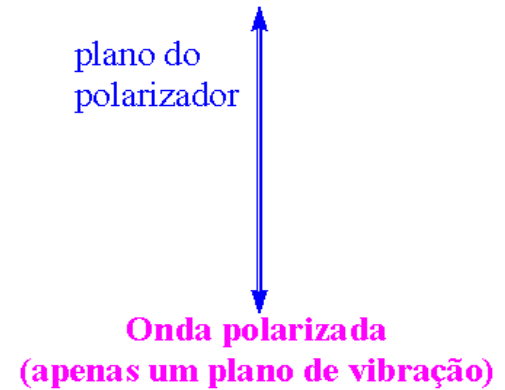
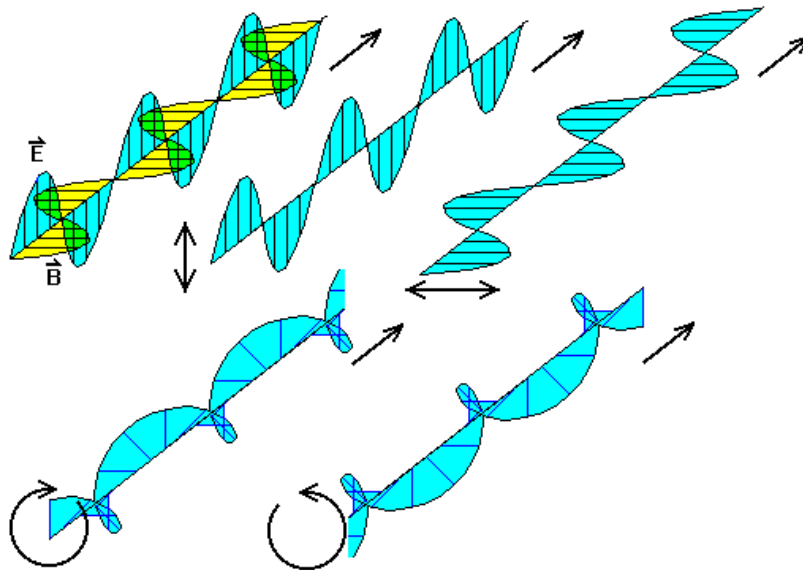


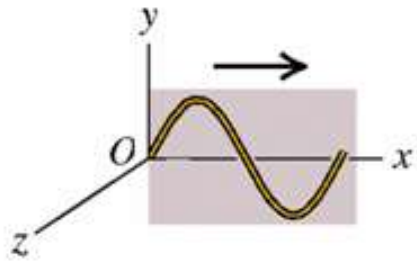
(b)

O arco-íris é formado pela dispersão, refração e reflexão em gotículas de água. (a) A parte externa do arco-íris primário é vermelha e a parte interna é violeta; a seqüência das cores do espectro é: vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul, anil e violeta. Os comprimentos de onda das principais cores são indicados na Tabela 33.1. (b) A parte externa do arco-íris secundário menos brilhante é violeta e a parte interna é vermelha; a seqüência das cores do arco-íris secundário é invertida em relação à seqüência das cores do arco-íris primário.

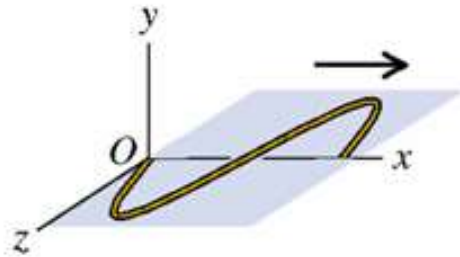
POLARIZAÇÃO

Ondas eletromagnéticas: campos elétricos e magnéticos oscilantes. Polarização: a onda oscila num só plano de vibração

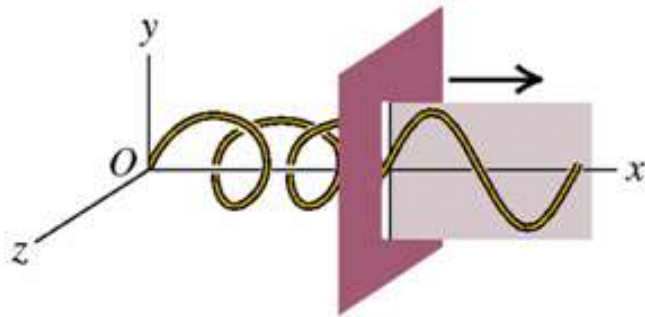




(a)



(b)

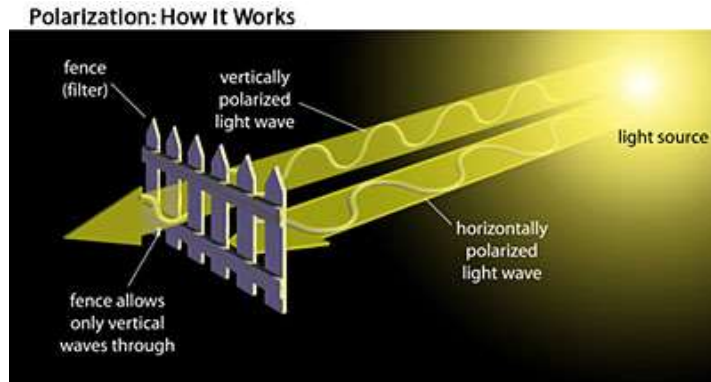


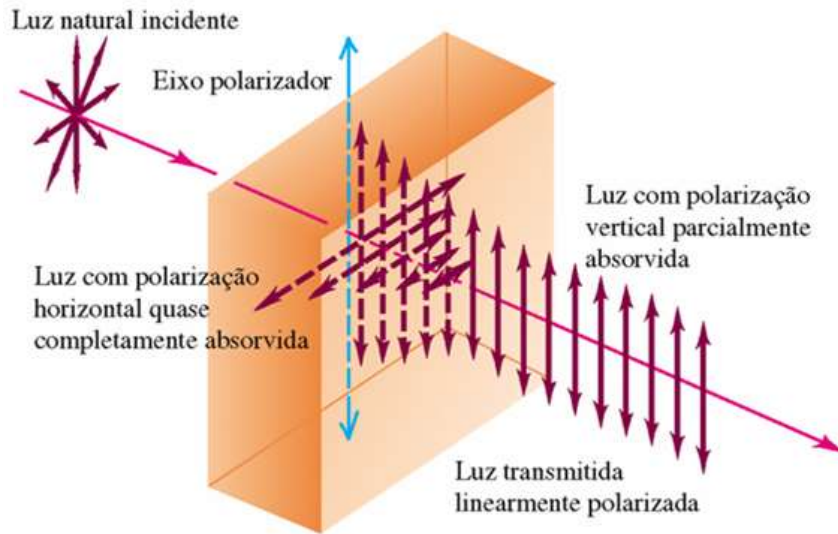
(c)

(a) Onda transversal em uma corda, polarizada na direção y . (b) Onda transversal em uma corda, polarizada na direção z . (c) Uma barreira que contém uma fenda vertical sem atrito bloqueia as ondas polarizadas na direção z , deixando passar somente as ondas polarizadas na direção y , funcionando como um filtro polarizador.

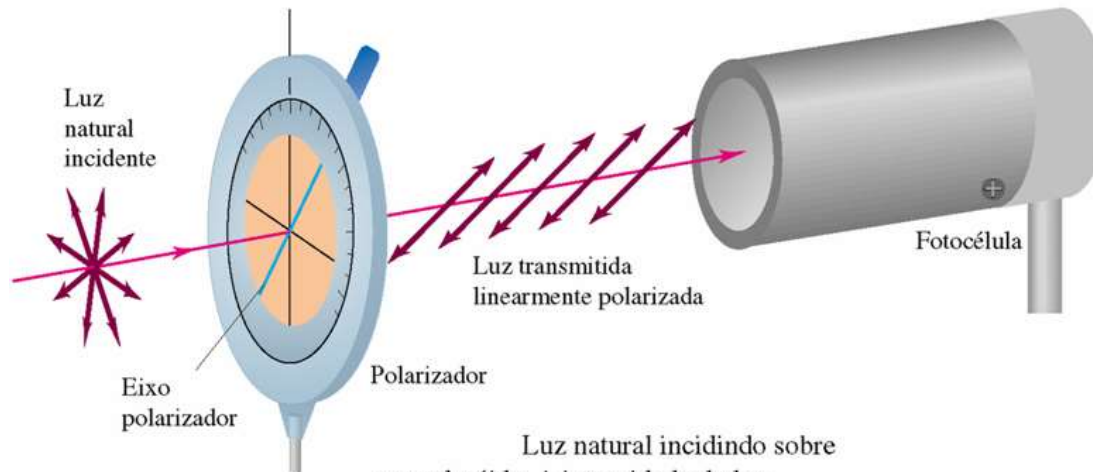
POLARIZAÇÃO

Polarizador: permite a passagem das componentes paralelas ao seu eixo óptico dos planos de vibração da onda incidente

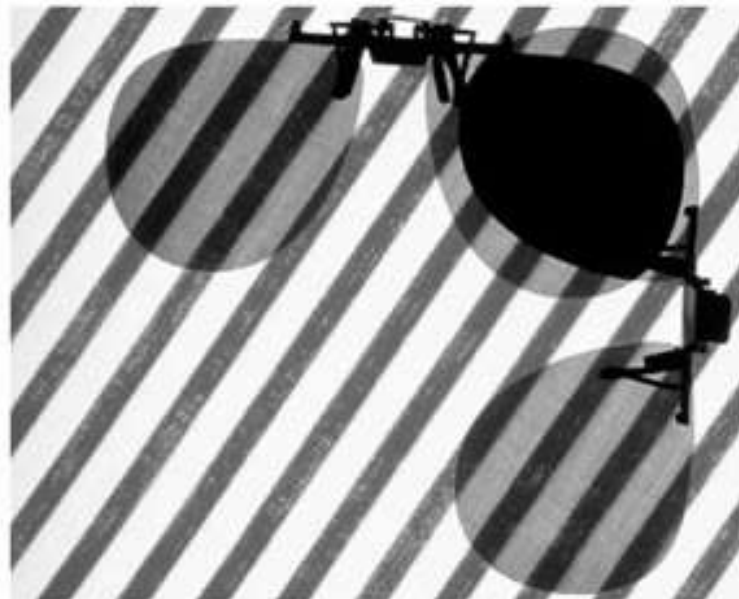
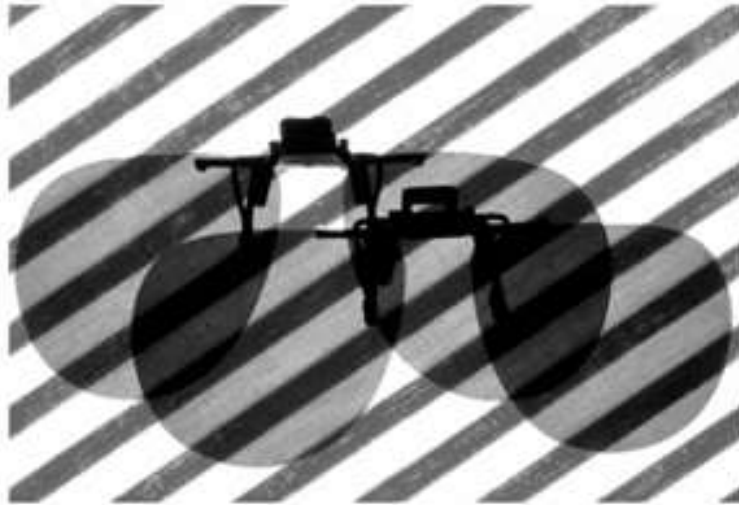




Um filtro polaróide é iluminado por luz natural não-polarizada (representada pelos vetores \vec{E} que apontam em todas as direções perpendiculares à direção de propagação). Os componentes de \vec{E} perpendiculares à direção do eixo polarizador são absorvidos pelo filtro. A luz transmitida é linearmente polarizada (representada pelos vetores \vec{E} que apontam nos dois sentidos da direção única paralela ao eixo polarizador).



Luz natural incidindo sobre um polaróide. A intensidade da luz linearmente polarizada transmitida, medida pela fotocélula, é sempre a mesma para qualquer orientação do eixo polarizador. Para um polaróide ideal, a intensidade da luz transmitida é a metade da intensidade da luz incidente.



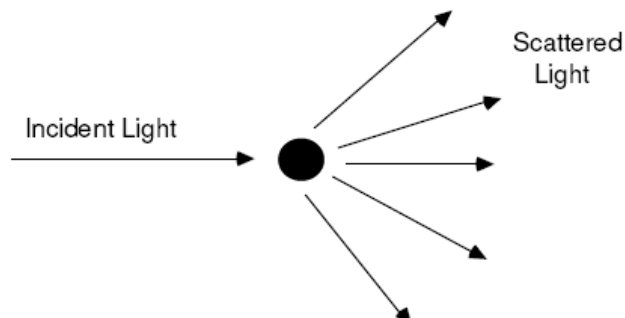
As fotos acima mostram a visão através de dois óculos de sol com lentes polaróides cujos eixos são paralelos (no topo, $\phi = 0$) e perpendiculares (na parte de baixo, $\phi = 90^\circ$). A intensidade transmitida é máxima quando os eixos são paralelos; ela é igual a zero quando os eixos são perpendiculares.

ESPALHAMENTO

A radiação é absorvida e, depois, retransmitida em muitas direções. Se a terra não possuísse atmosfera, o céu seria negro tanto durante o dia quanto a noite. Tal como um astronauta vê o céu na lua.



As nuvens geralmente são brancas porque elas espalham eficientemente todas as cores da luz solar.



ESPALHAMENTO

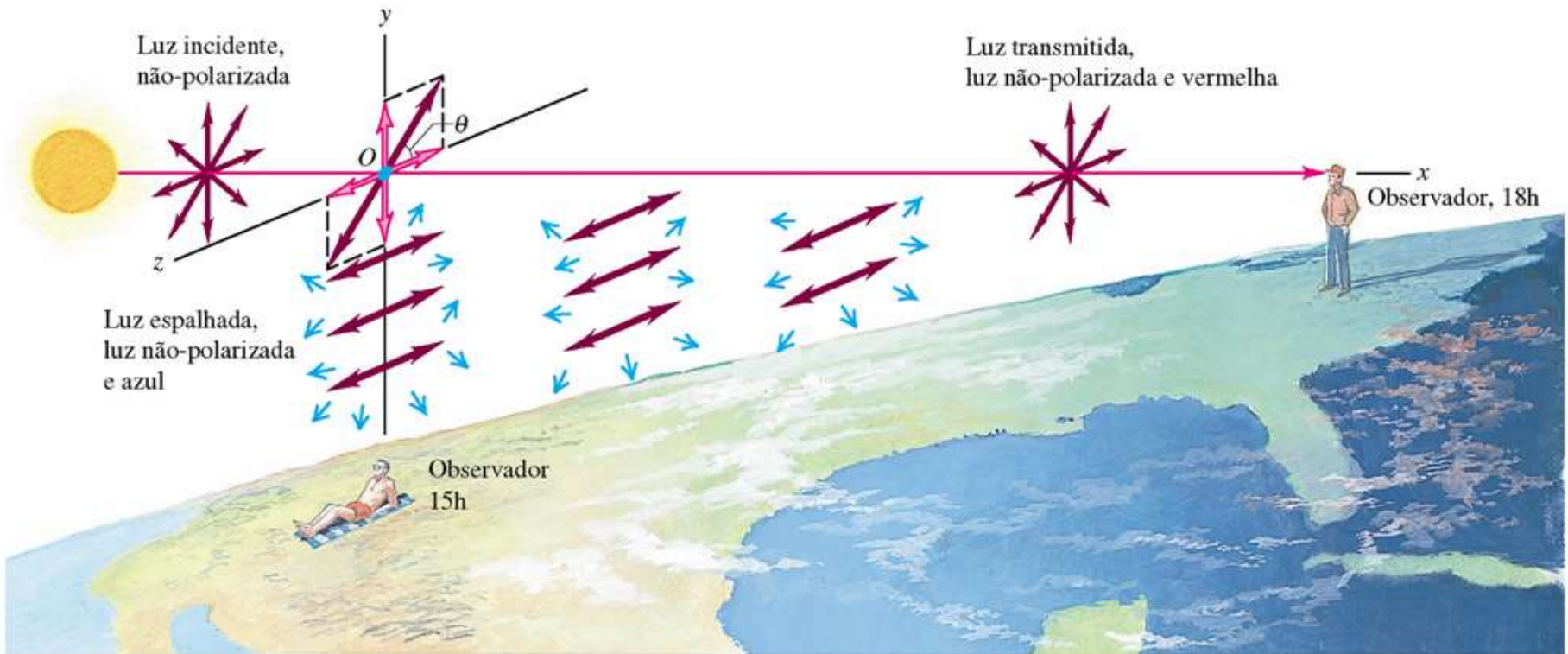


FIGURA 34.25 O banhista deitado que se encontra no lado oeste observa a luz solar que foi espalhada a 90° . Essa luz espalhada é linearmente polarizada e contém predominantemente a luz azul da extremidade do espectro. A luz branca inicial vai perdendo seu componente azul à medida que se propaga através da atmosfera, e a luz transmitida vista pelo observador que está em pé no leste contém predominantemente a luz vermelha da outra extremidade do espectro.

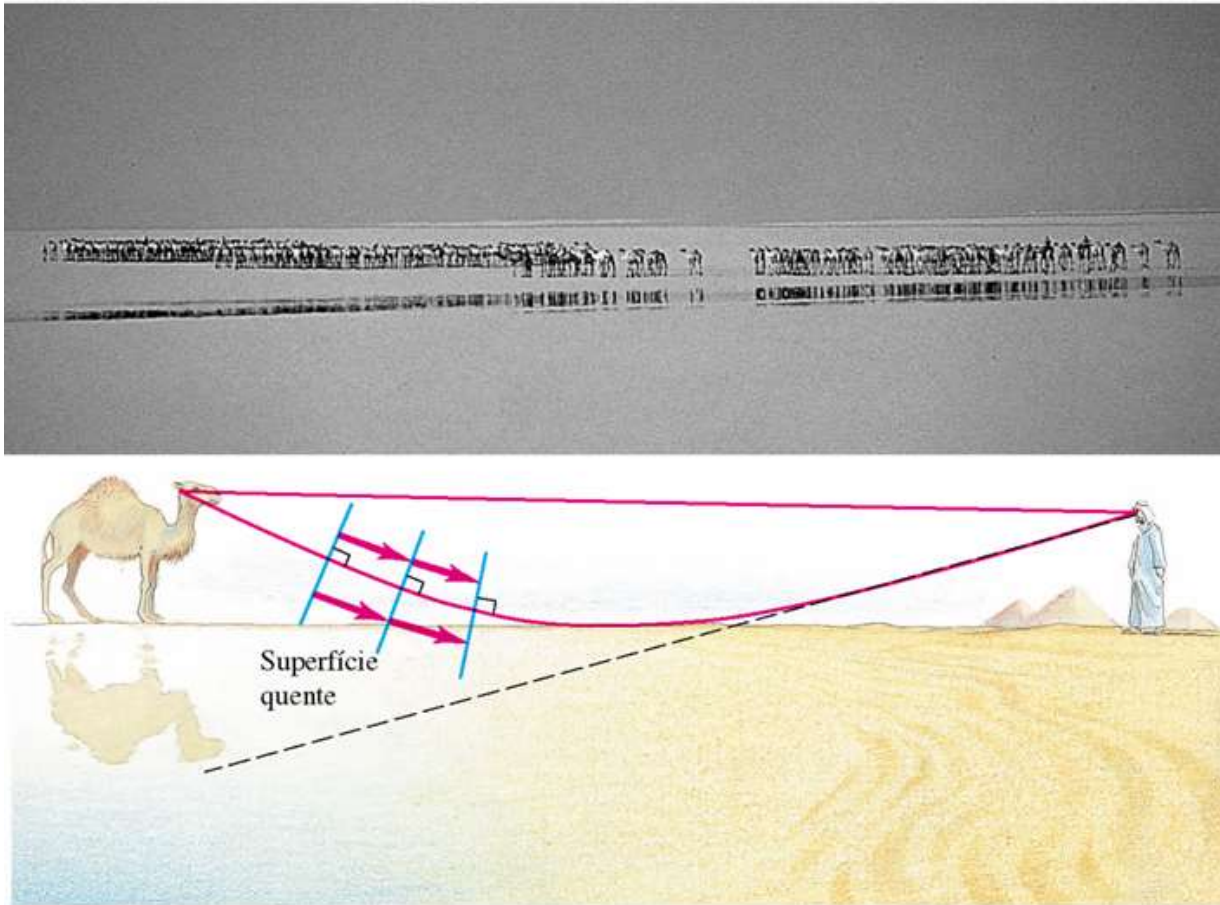
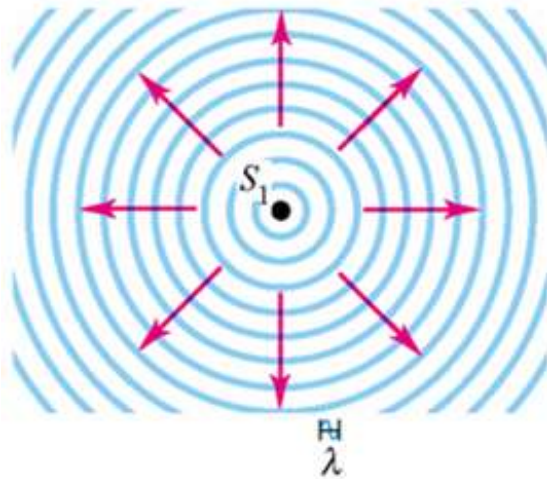


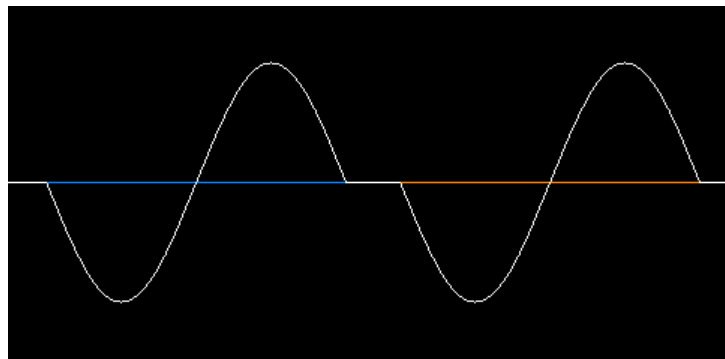
FIGURA 34.29 Uma miragem é observada porque as ondas secundárias próximas da superfície quente possuem raios vt ligeiramente maiores, de modo que as frentes de onda se inclinam levemente e as trajetórias dos raios se encurvam.

Superfície quente menos densa altera o índice de refração e conseqüentemente o ângulo. O meio não é homogêneo!!!

INTERFERÊNCIA

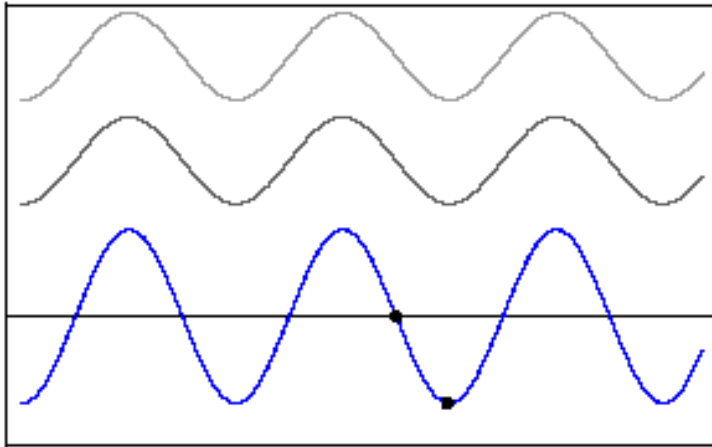


Uma representação “instantânea” de uma onda senoidal com frequência f e comprimento de onda λ se espalhando em todas as direções para fora a partir da fonte S_1 . As circunferências concêntricas são frentes de onda que representam as cristas das ondas separadas por um comprimento de onda. À medida que o tempo passa, as frentes de onda se espalham para fora a partir da fonte S_1 com a velocidade da onda, que é dada pelo produto de f e λ .

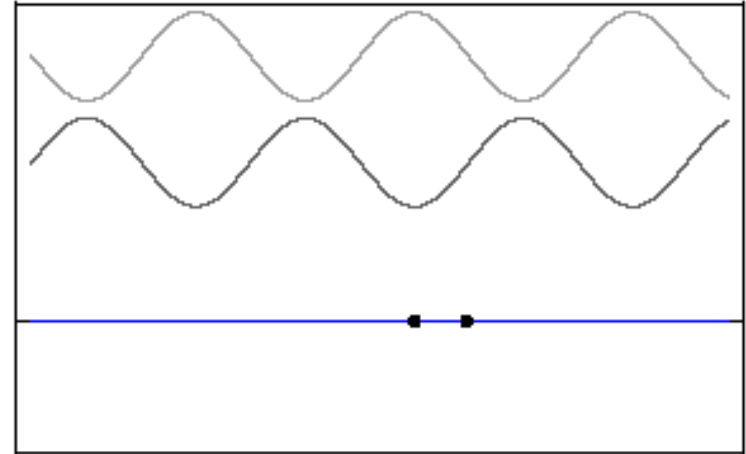


**Superposição de duas
ou mais ondas**

INTERFERÊNCIA



Interferência construtiva



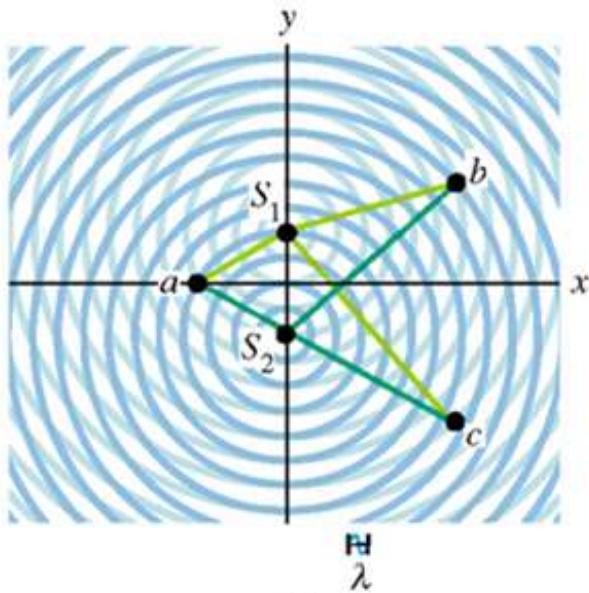
Interferência destrutiva



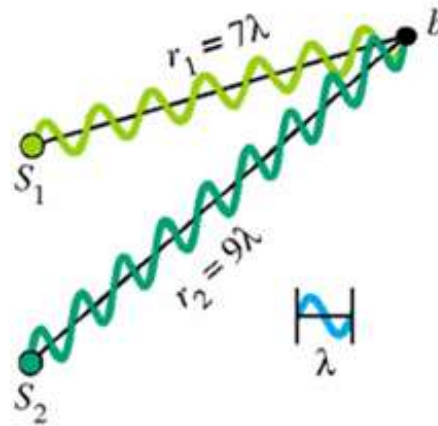
Thomas Young (1773 - 1829)

Experimentos sobre a natureza ondulatória da luz

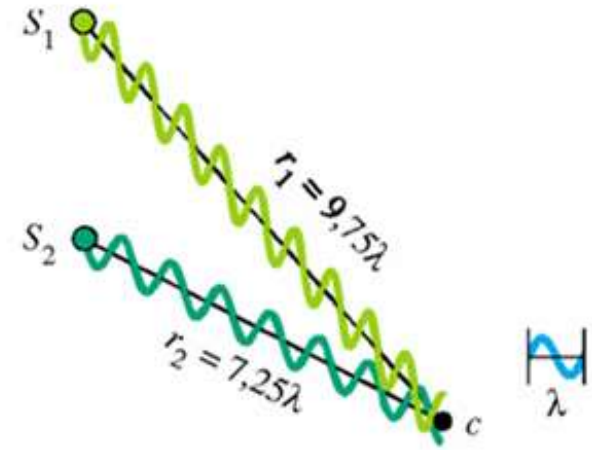
Interferência construtiva e destrutiva



(a)



(b)



(c)

(a) Uma representação “instantânea” de ondas senoidais espalhando-se para fora a partir de duas fontes coerentes S_1 e S_2 . As duas fontes estão em fase. Neste exemplo a distância entre as fontes é igual a 4λ . (b) A interferência construtiva ocorre em pontos para os quais a diferença de caminho (neste caso, a diferença das distâncias entre o ponto e as duas fontes) é igual a um número inteiro de comprimentos de onda, $m\lambda$. (c) A interferência destrutiva ocorre em pontos para os quais a diferença de caminho é igual a um número semi-inteiro de comprimentos de onda, $(m + 1/2)\lambda$.

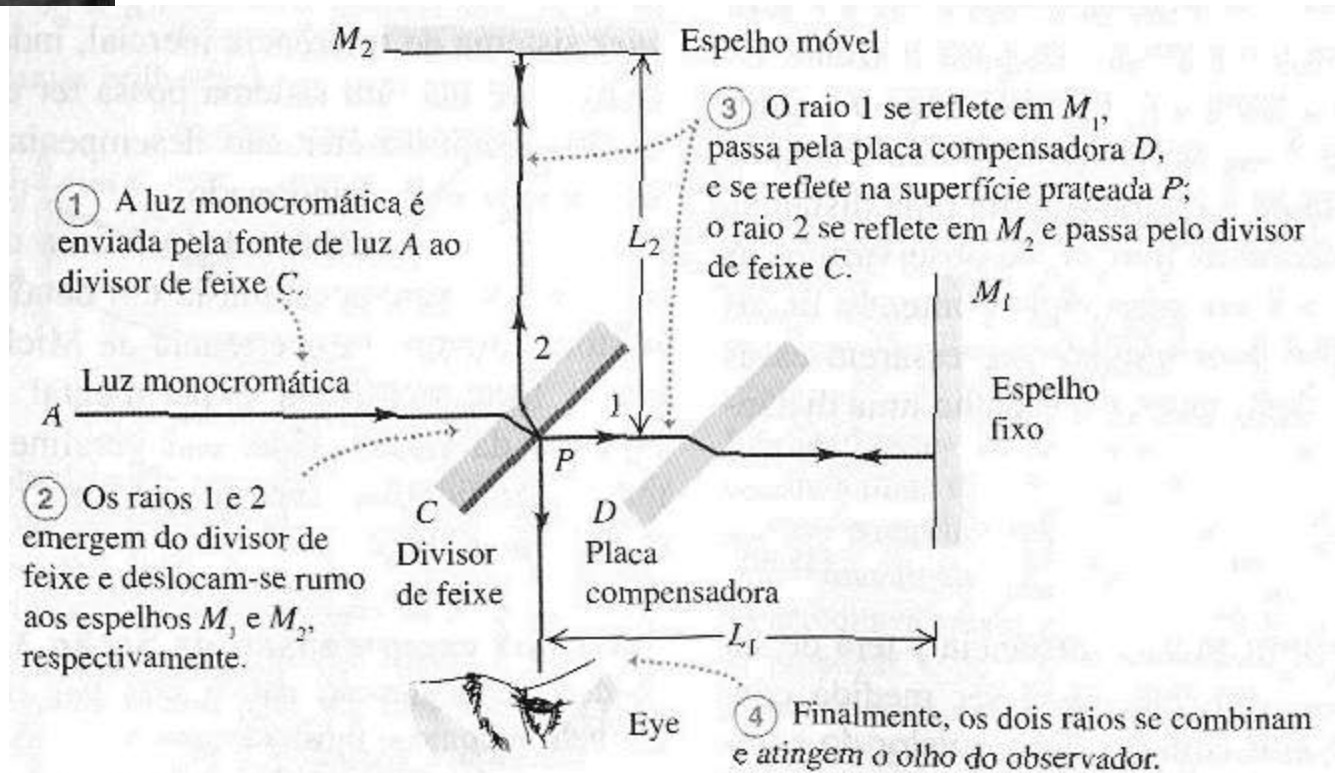
INTERFERÔMETRO DE MICHELSON



Albert Abraham Michelson (1852 - 1931)

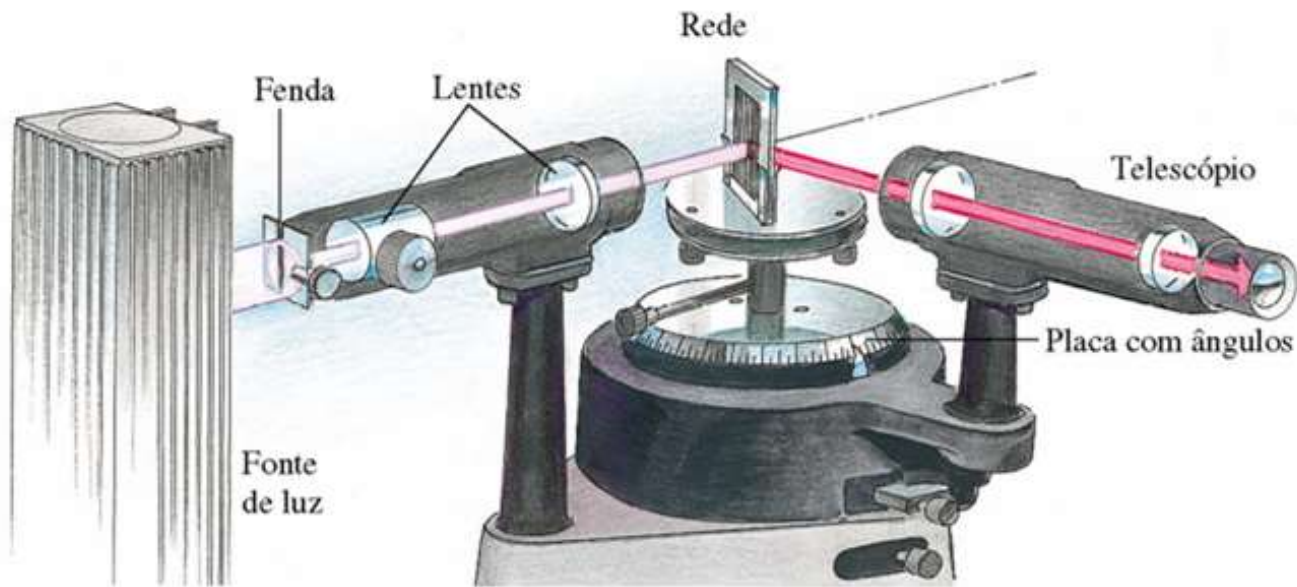
Nascido na Prússia.

Prêmio Nobel de Física em 1907.

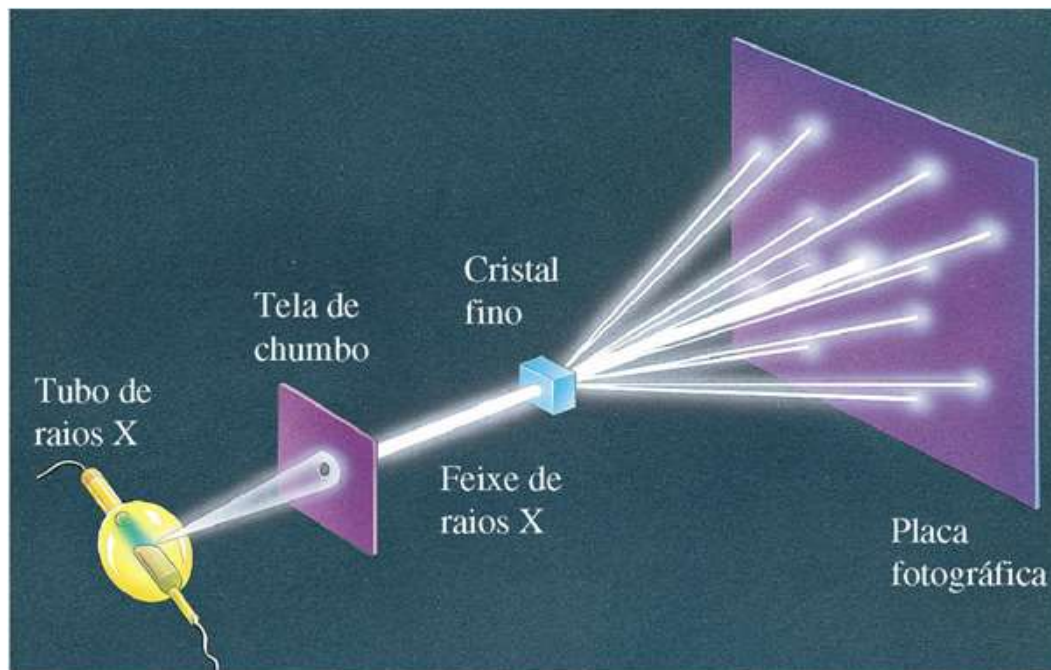


DIFRAÇÃO

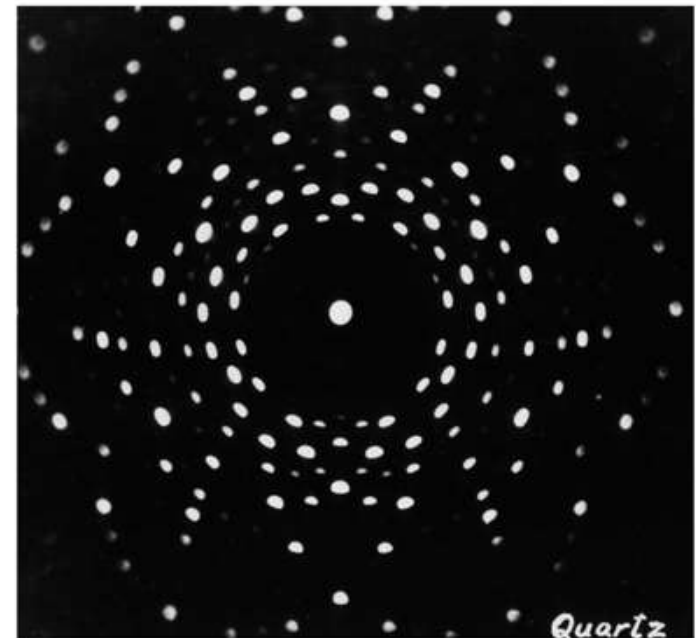
Espectrômetro



Um espectrômetro usando uma rede de difração. As lentes entre a fonte e a rede produzem um feixe de raios paralelos que incide sobre a rede. Esse feixe, ao incidir perpendicularmente ao plano da rede, sofre difração produzindo espectros de várias ordens, cujas direções são determinadas pela Equação (38.13). O feixe difratado é observado através de um telescópio cuja ocular possui linhas de referência para medir com precisão o ângulo θ .



(a)

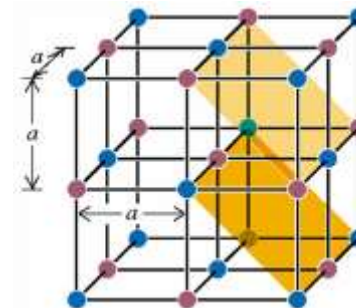
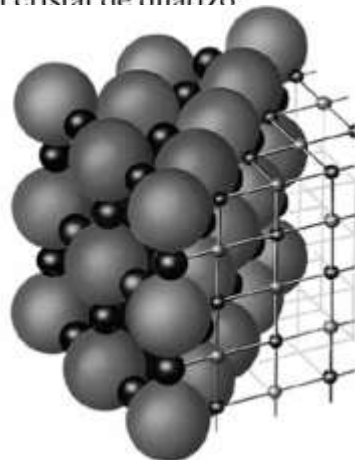


(b)

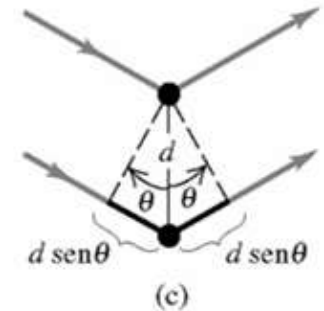
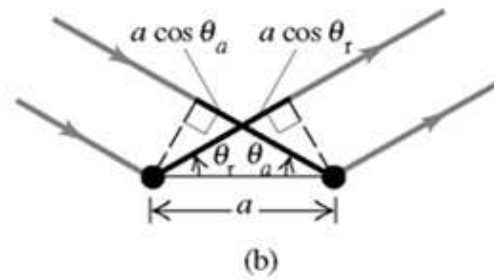
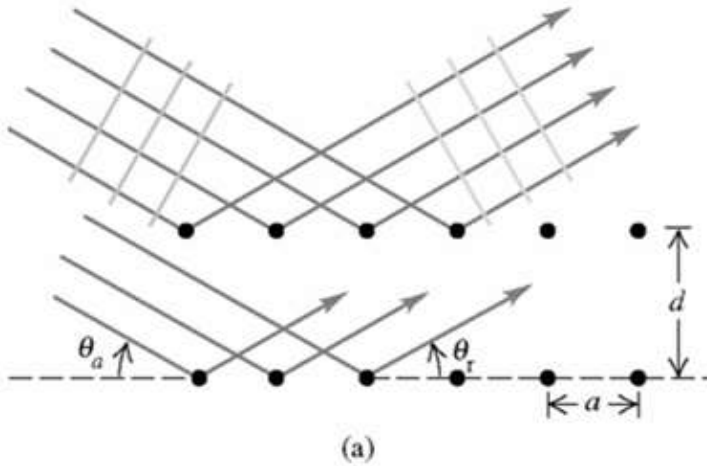
(a) Em uma experiência de difração de raios X, muitos raios X passam em linha reta através do cristal. Alguns, porém, são espalhados e formam uma figura de interferência que impressiona o filme com uma configuração relacionada com o arranjo atômico na rede cristalina.

(b) Figura de difração (ou *figura de difração de Laue*) formada direcionando-se um feixe de raios X sobre uma pequena seção de um cristal de quartzo.

Modelo do arranjo dos íons em um cristal de NaCl (sal de cozinha). Os íons de Na são as esferas negras pequenas; os íons de Cl são as outras esferas. A menor distância entre esses dois íons é igual a 0,282 nm. Ocorre na verdade uma superposição entre as nuvens eletrônicas dos átomos, porém eles são representados por esferas para maior clareza.



Lei de Bragg



(a) Espalhamento de ondas de uma rede retangular. (b) A interferência de ondas provenientes de átomos adjacentes da mesma linha é construtiva quando $a \cos \theta_a = a \cos \theta_r$, ou seja, quando o ângulo de incidência θ_a é igual ao ângulo de reflexão θ_r . Ambos os ângulos são medidos a partir da *superfície* do cristal e não a partir da normal. (c) A interferência de linhas adjacentes também é construtiva quando a diferença de caminho $2d \sin \theta$ é igual a um número inteiro de comprimentos de onda, como na Equação (38.16).

DIFRAÇÃO EM ORIFÍCIOS CIRCULARES

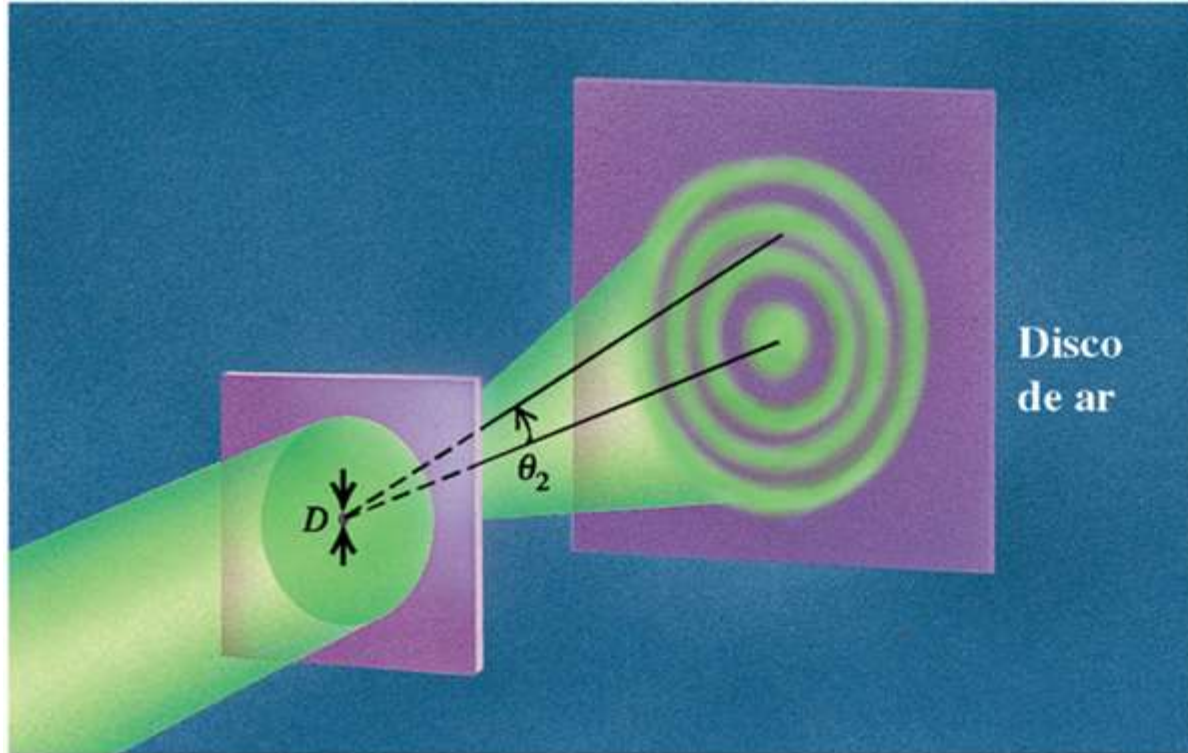
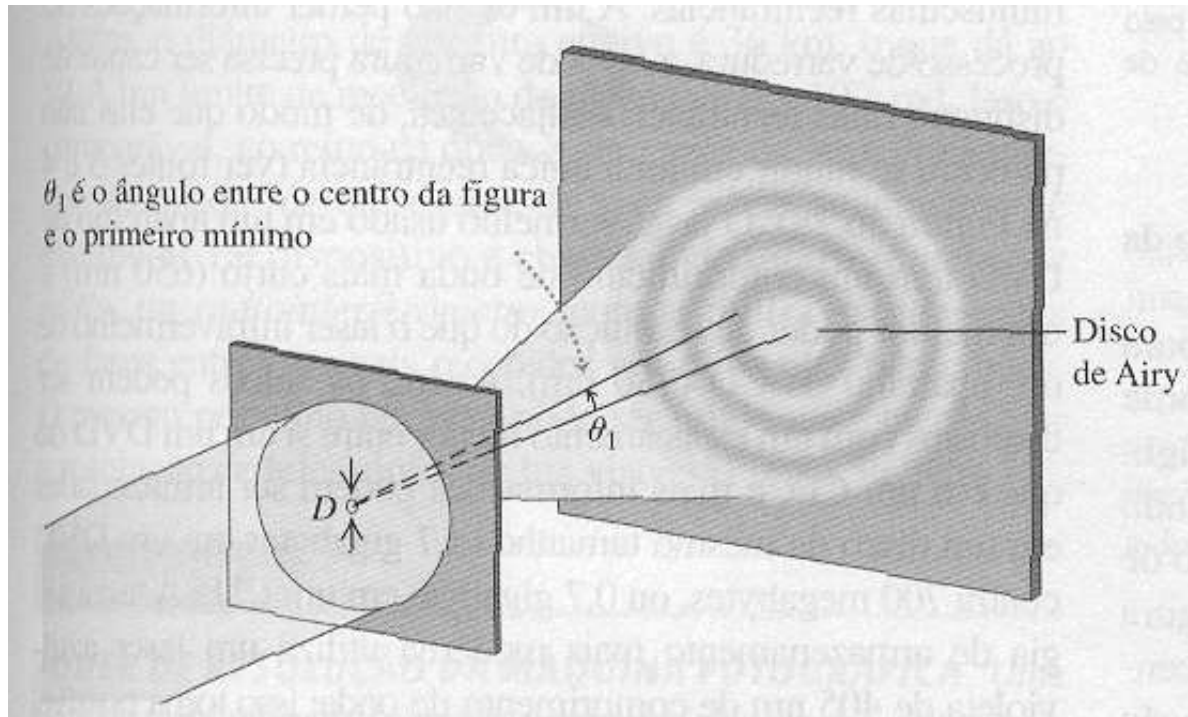


Figura de difração formada por uma abertura circular com diâmetro D . A figura é constituída por um disco central brilhante circundado por anéis claros e escuros. O raio angular do θ_2 do segundo anel escuro é indicado. (Este diagrama não foi desenhado em escala.)



George Biddell Airy (1801 – 1892)

DIFRAÇÃO EM ORIFÍCIOS CIRCULARES



D = diâmetro do círculo

$$\text{sen } \theta_1 = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Figura de difração = disco central brilhante (disco de Airy) circundado por anéis claros e escuros

RESSONÂNCIA

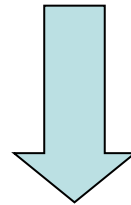
Qualquer sistema físico que é posto a oscilar livremente possui a tendência de oscilar com uma frequência específica de oscilação denominada frequência preferencial de vibração, que pode ser única ou não, dependendo do sistema físico considerado



Ponte de Tacoma vibrando no modo torsional.

RESSONÂNCIA

Quando num sistema físico qualquer são injetados impulsos de energia periodicamente com uma frequência igual a uma de suas frequências preferenciais de vibração, o sistema passa a vibrar com amplitude progressivamente crescente, que tende ao maior valor possível.



Entrar em Ressonância

BIBLIOGRAFIA

Física IV : ótica e física moderna/ Young e Freedman;
Editora Pearson Education do Brasil, São Paulo,
2009.