

Física IV



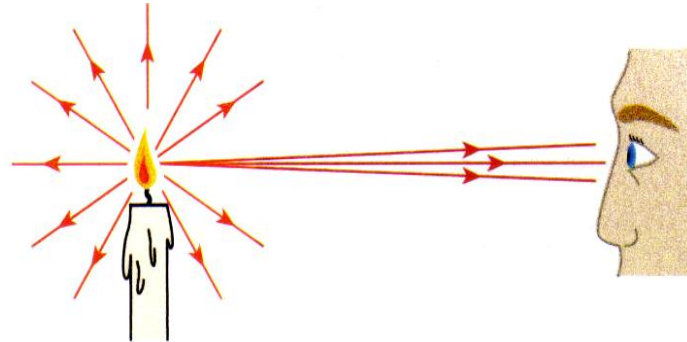
NATUREZA E PROPAGAÇÃO DA LUZ

Prof. Nelson Luiz Reyes Marques

I- NATUREZA DA LUZ

1- Luz

- A luz é uma onda eletromagnética capaz de sensibilizar nossos órgãos visuais



2- NATUREZA DA LUZ

- Isaac Newton (1642-1727): luz era constituída por feixes de partículas (chamadas corpúsculos) emitidas pelas fontes de luz.
- Por volta de 1665, surgiram as primeiras evidências das propriedades ondulatórias da luz.
- No início do século XIX, as evidências de que a luz é uma onda tinham se tornado bastante convincentes.

I- NATUREZA DA LUZ

- Em 1873, James Clerk Maxwell previu a existência das ondas eletromagnéticas e calculou a velocidade de propagação dessas ondas.
- Esse desenvolvimento, com o trabalho experimental de Heinrich Hertz iniciado em 1887, mostrou de maneira irrefutável que a luz realmente é uma onda eletromagnética.

3- Os dois aspectos da luz

- A natureza ondulatória da luz, entretanto, não é suficiente para explicar todo seu comportamento.
- Diversos efeitos associados à emissão e absorção da luz revelam a natureza corpuscular da luz, no sentido de que a energia transportada pela onda luminosa é concentrada em pacotes distintos conhecidos como *fótons* ou *quanta*.

I- NATUREZA DA LUZ

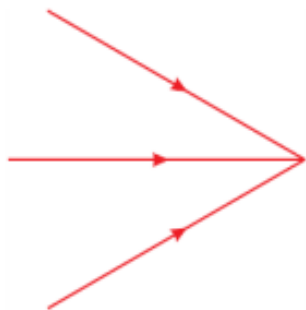
- Os aspectos ondulatórios e corpusculares da luz aparentemente contraditórios foram conciliados em 1930, com o desenvolvimento da eletrodinâmica quântica, uma teoria abrangente que explica simultaneamente essas duas propriedades.
- A propagação da luz pode ser mais bem descrita usando-se um modelo ondulatório;
- Para explicar a emissão e a absorção da luz, é necessário considerar sua natureza corpuscular.
- As fontes fundamentais de todos os tipos de ondas eletromagnéticas são cargas elétricas aceleradas.
- Todos os corpos emitem uma radiação eletromagnética, resultado do movimento térmico de suas moléculas; essas ondas constituem a chamada **radiação térmica** e apresentam uma mistura de comprimentos de onda diferentes.

I- NATUREZA DA LUZ

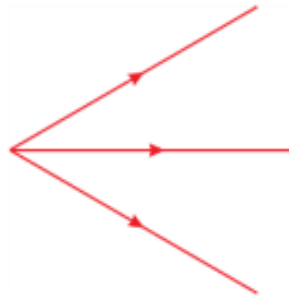
4- Raio de luz: linha orientada que representa, graficamente, a direção e o sentido de propagação da luz.



5- Feixe de luz: conjunto de raios de luz.



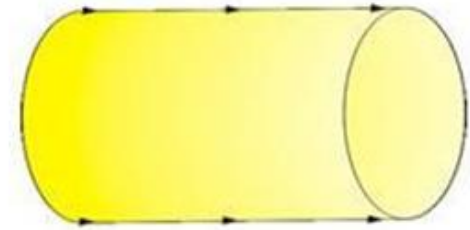
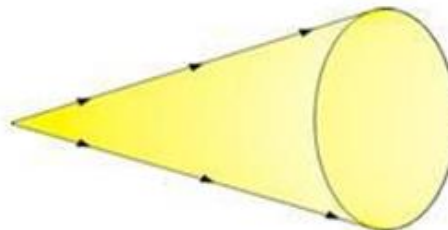
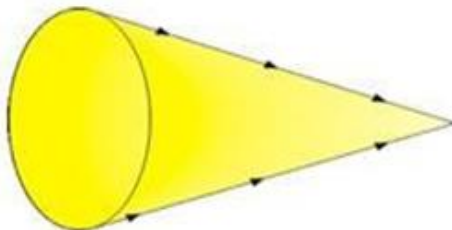
Pincel cônico convergente



Pincel cônico divergente



Pincel cilíndrico



I- NATUREZA DA LUZ

6- Fonte de Luz: todo corpo capaz de emitir luz.

a- Fonte Primária: emite luz própria (corpos luminosos).

- **Incandescente** – quando emite luz a alta temperatura. Exemplo: lâmpada incandescente, a temperatura do filamento chega a cerca de $2\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Luminescente** – quando emite luz a temperatura relativamente baixa. Exemplo: vaga-lume, lâmpadas fluorescentes, objetos fosforescentes (como interruptor de luz, mostrado de alguns relógios etc.).

b- Fonte Secundária: emite luz que recebe de outro corpo (corpos iluminados).

I- NATUREZA DA LUZ

7- Meios de propagação da luz

- a- **Meio Transparente:** permite a propagação da luz através de si, segundo trajetórias regulares, permitindo a visão nítida dos objetos (vidro comum, ar).
- b- **Meio Translúcido:** permite a propagação da luz através de si, segundo trajetória irregular, não permitindo a visão nítida dos objetos (vidro fosco, papel de seda).
- c- **Meio Opaco:** Não permite a propagação da luz através de si (madeira e parede de tijolos).

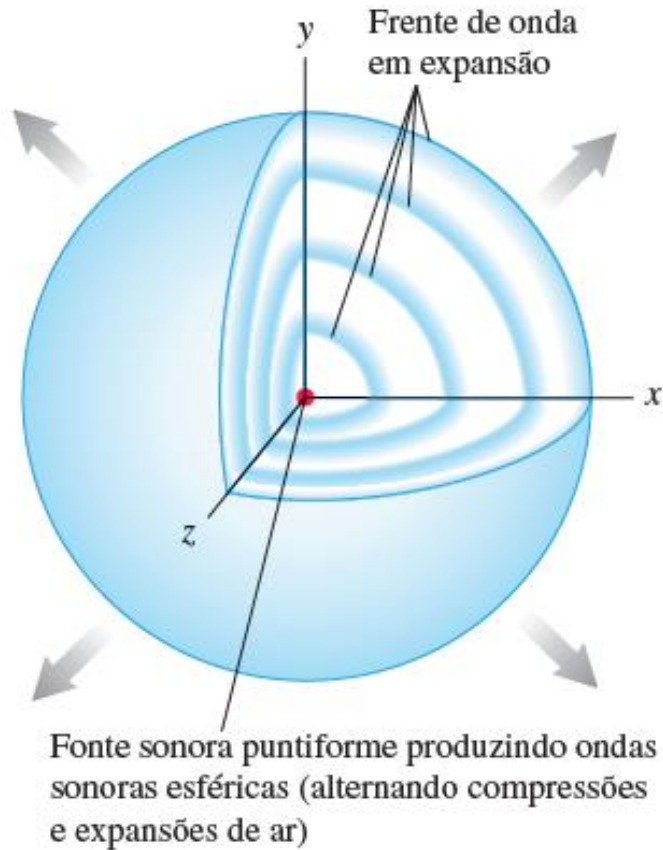
I- NATUREZA DA LUZ

8- Tipos de meios ópticos:

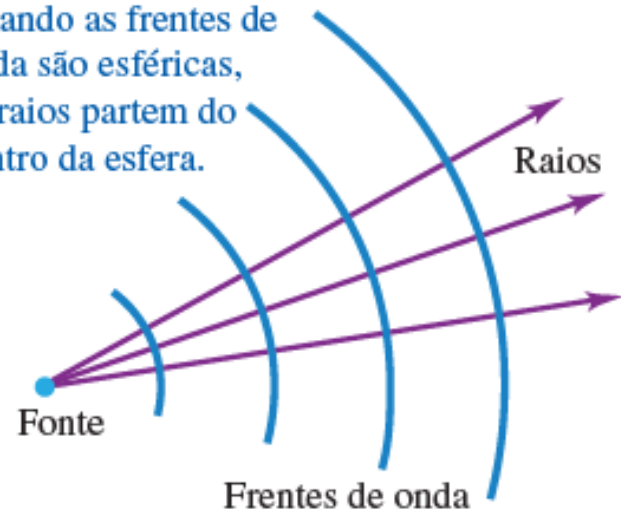
- a- Meio Homogêneo:* É aquele apresenta as mesmas propriedades físicas em toda a sua extensão.
- b- Meio Isótropo:* É aquele no qual a luz se propaga com a mesma velocidade em todas as direções e sentidos.

I- NATUREZA DA LUZ

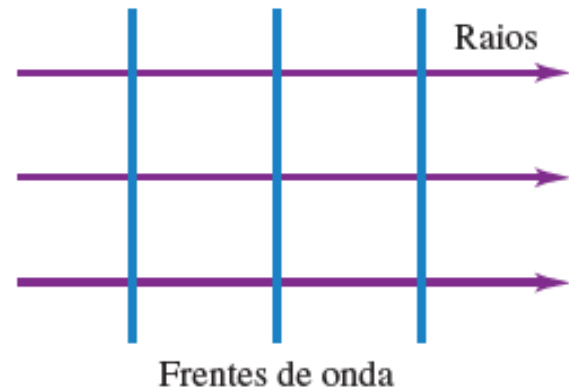
8- Onda, raio e frente de onda:



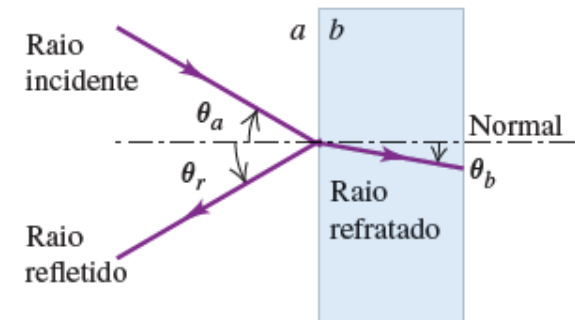
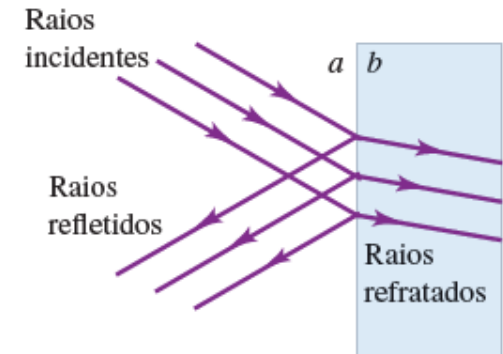
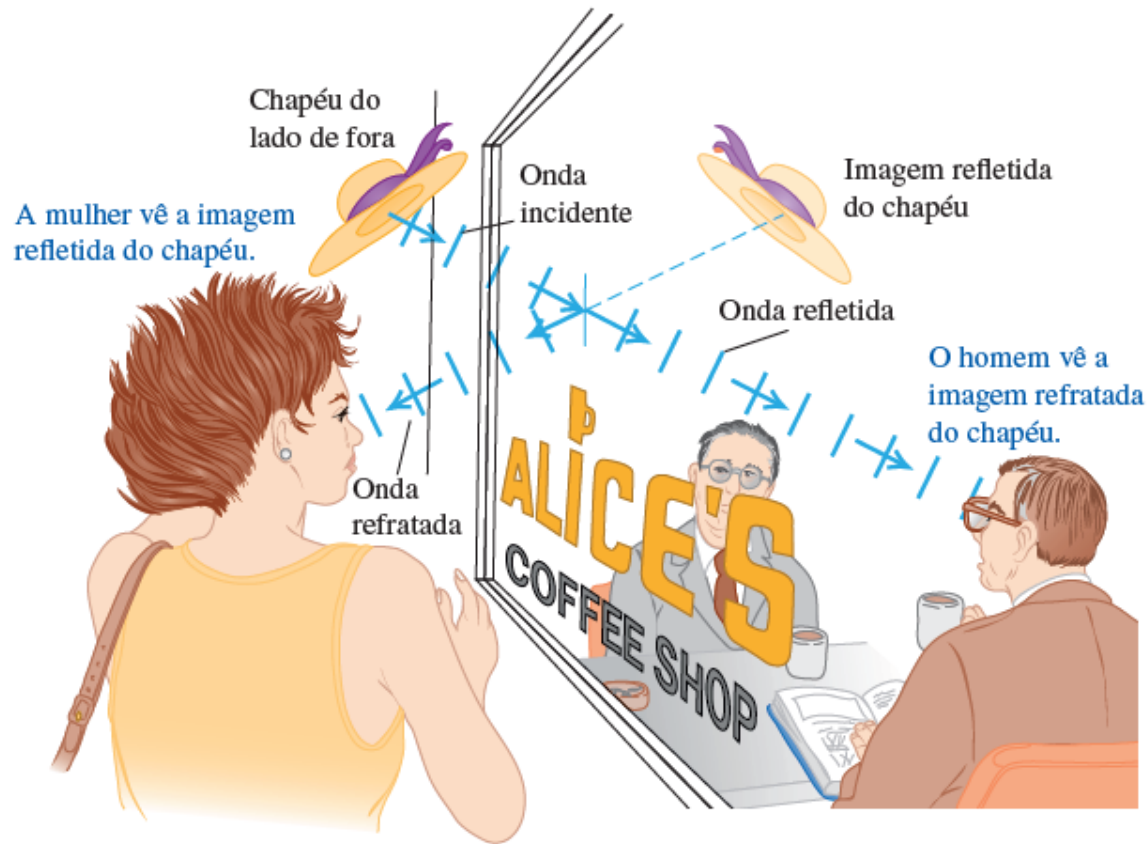
Quando as frentes de onda são esféricas, os raios partem do centro da esfera.



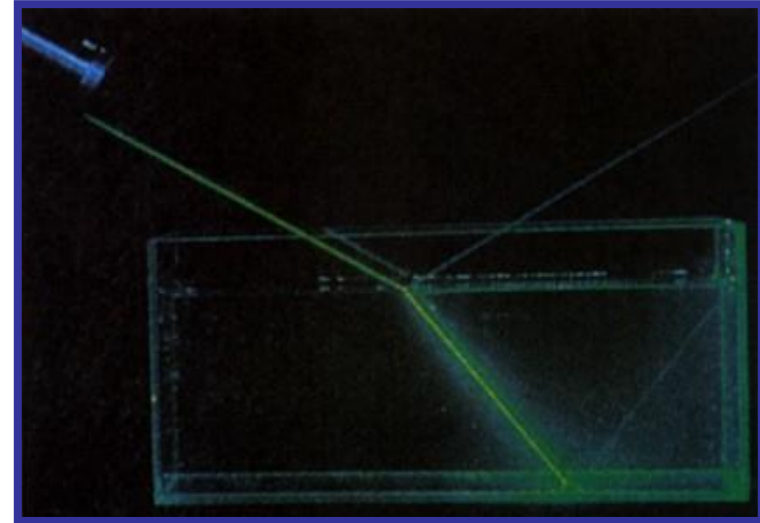
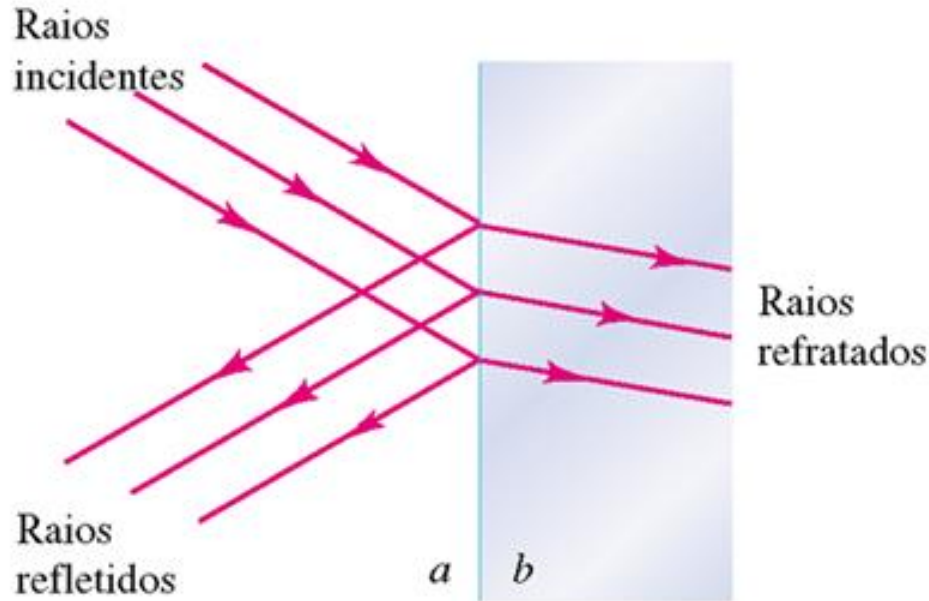
Quando as frentes de onda são planas, os raios são perpendiculares a elas e paralelos uns aos outros.



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ



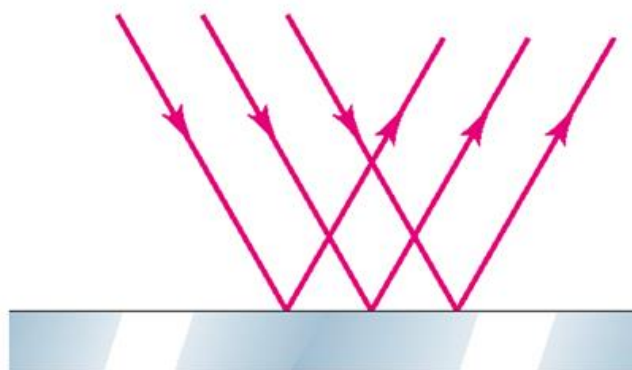
Obs.: A refração sempre vem acompanhada da reflexão

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

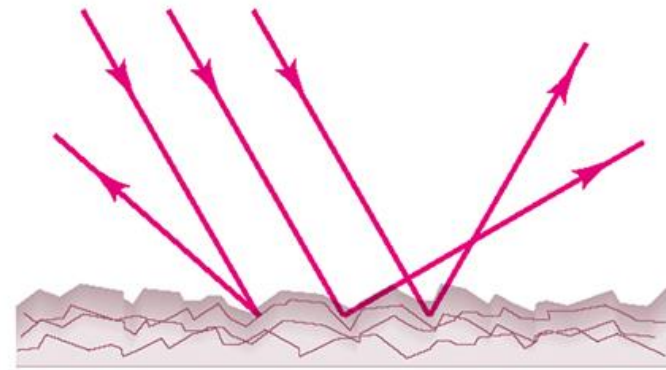
1- Tipos de reflexão

a) Reflexão especular: Ocorre em superfícies polidas (bem lisas). Aqui a forma do pincel de luz não é destruída depois da reflexão.

b) Reflexão difusa: Ocorre em superfícies rugosas (cheias de irregularidades). Aqui a forma do pincel de luz é destruída depois da reflexão, ou seja, a luz acaba sendo espalhada para várias direções. Veja a figura abaixo:



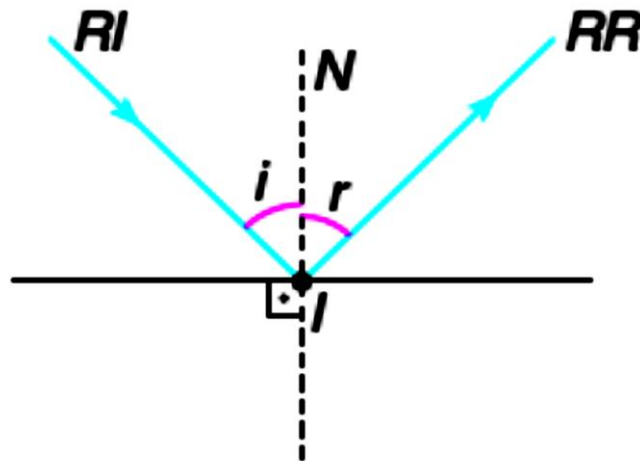
(a)



(b)

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

2- Leis da reflexão



1º Lei: “o raio incidente R , a normal N e o raio refletido R' são coplanares.”

2º Lei: “o ângulo de reflexão r é igual ao ângulo de incidência i .”

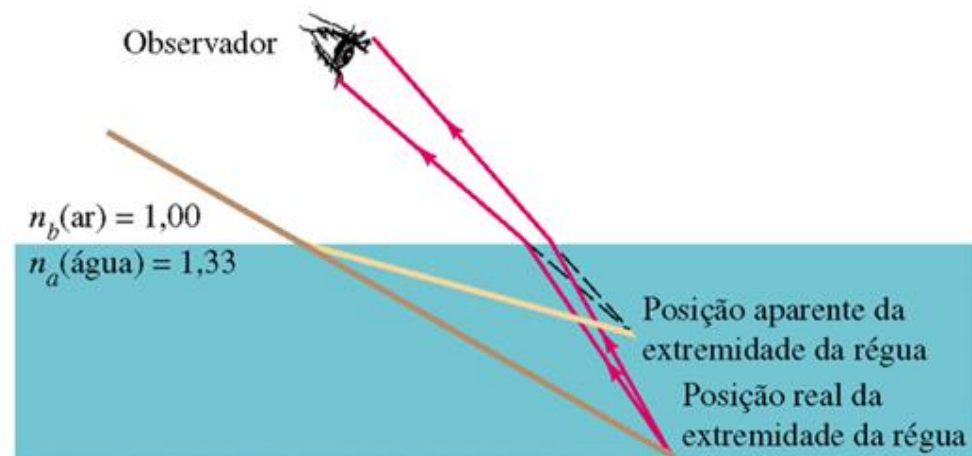
II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

3- Índice de refração absoluto (n): é a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio considerado.

$$n_{\text{meio}} = \frac{C}{V_{\text{meio}}}$$

onde $C = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = 3 \cdot 10^5 Km/s$

$$\begin{cases} n_{\text{vácuo}} = 1 \\ n_{\text{ar}} \cong 1 \\ n_{\text{demais meios}} > 1 \end{cases}$$



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

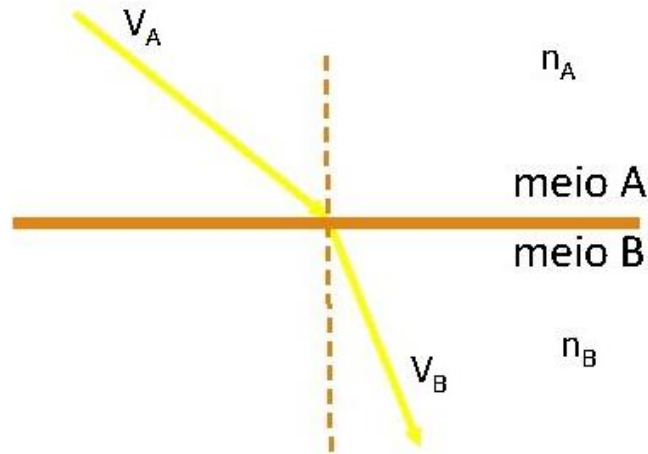
- Então, quanto **maior** for o índice de refração de uma substância, **maior** será sua refringência, ou seja, **mais dificuldades** a luz encontrará para atravessar seu interior. Por isso sua velocidade será **diminuir**.

meio mais refringente (+) $\Rightarrow$ $\begin{cases} \text{menor velocidade} \\ \text{menor comprimento de onda} \end{cases}$

meio menos refringente (-) $\Rightarrow$ $\begin{cases} \text{maior velocidade} \\ \text{maior comprimento de onda} \end{cases}$

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

4- Índice de refração relativo



- O índice de refração do meio A em relação ao meio B, é definido por:

$$n_{A,B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{v_B}{v_A}$$

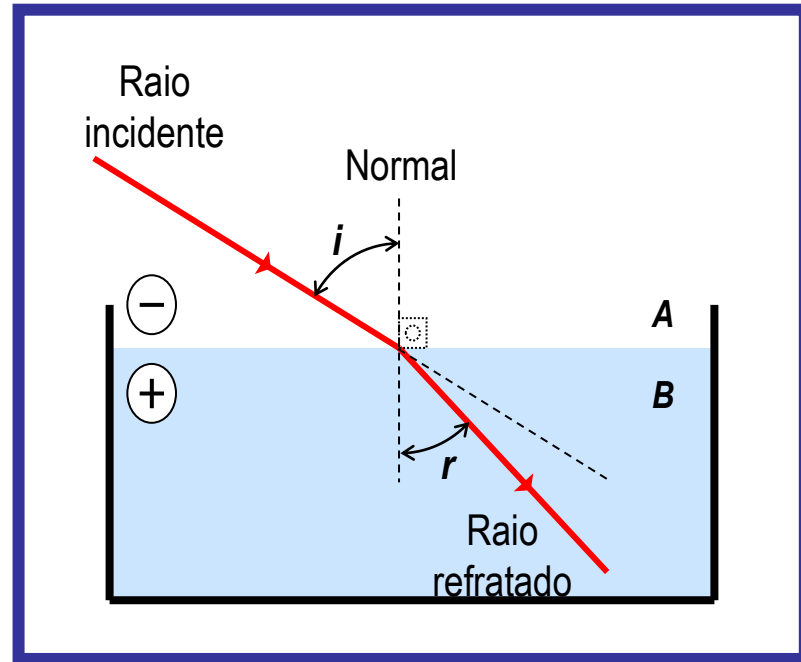
ou

$$n_{B,A} = \frac{n_B}{n_A} = \frac{v_A}{v_B}$$

$$n_{A,B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{\frac{C}{v_A}}{\frac{C}{v_B}} = \frac{v_B}{v_A}$$

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

5- Leis da refração

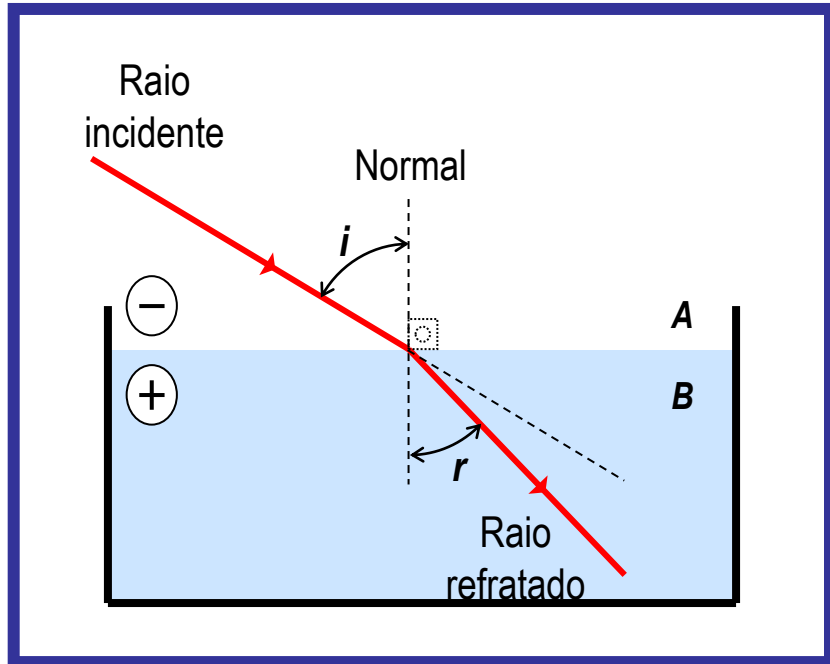


1ª Lei : o raio incidente, a reta normal e o raio refratado deverão estar contidos sempre num mesmo plano.

2ª Lei : Existe uma relação entre os ângulos de incidência e de refração de um raio de luz. Esta relação é representada pela Lei de Snell-Descartes.

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Lei de Snell-Descartes



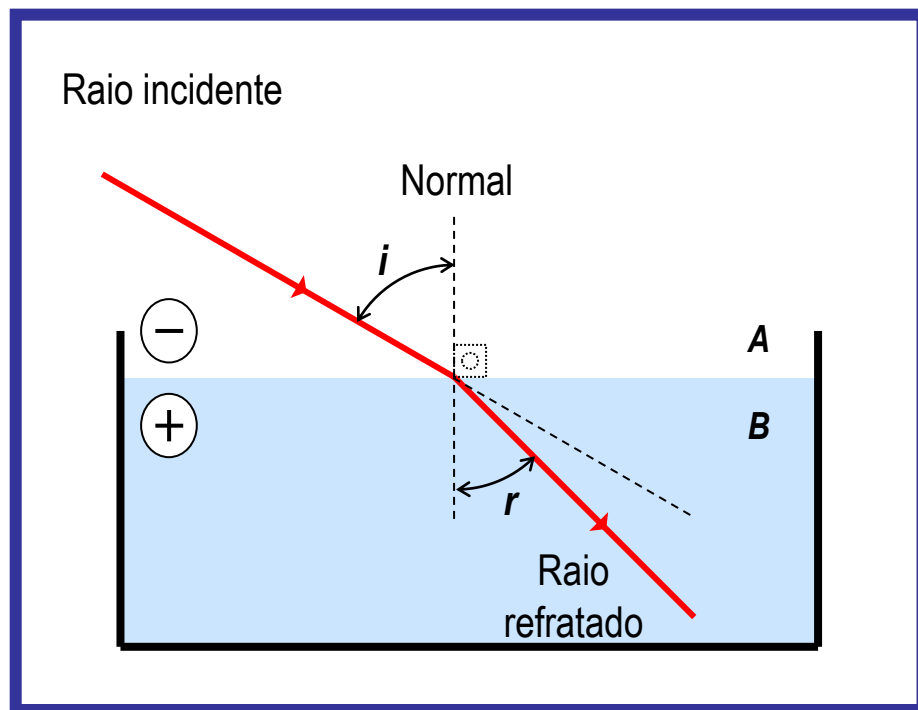
$$n_A \operatorname{sen} i = n_B \operatorname{sen} r$$

$$\frac{n_B}{n_A} = \frac{v_A}{v_B} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B}$$

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

6- propriedades da refração

1ª) $n_1 < n_2 \rightarrow$ Quando a luz passa do meio menos refringente para o meio mais refringente, a velocidade de propagação da luz diminui e o raio de luz se aproxima da normal, para incidência oblíqua.

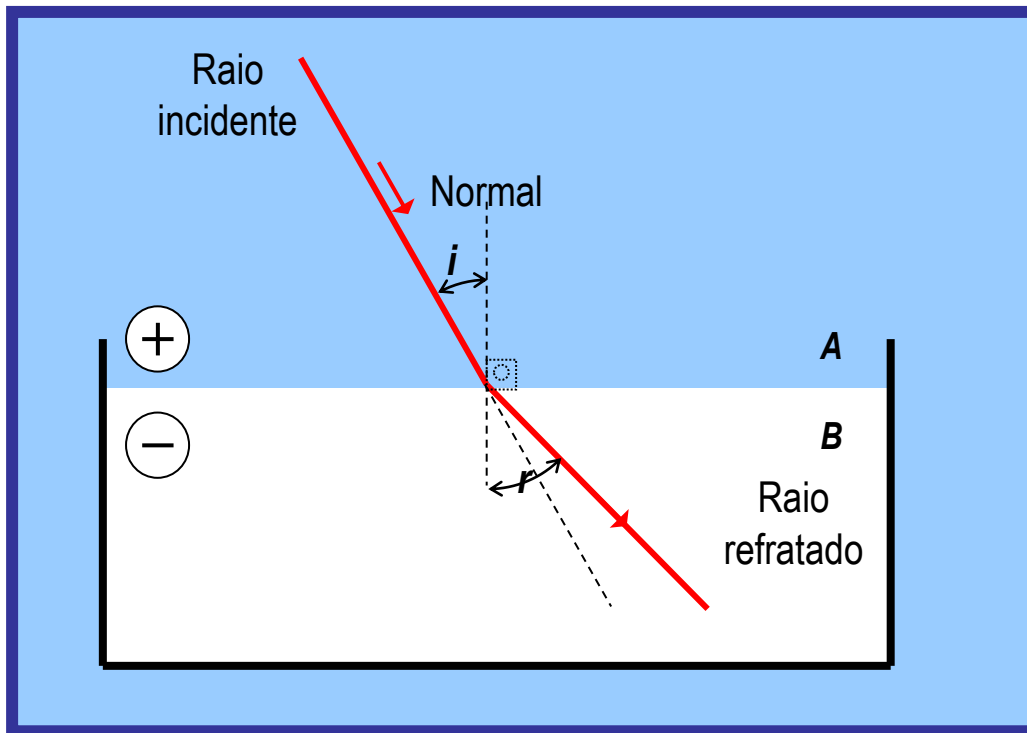


$$- \Rightarrow + \begin{cases} V_B < V_A \\ \lambda_B < \lambda_A \\ \hat{r} < \hat{i} \text{ (se } \hat{i} \neq 0) \end{cases}$$

Neste caso podemos dizer que o raio refratado aproxima-se da normal

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

2ª) $n_1 > n_2 \rightarrow$ Quando a luz passa do meio mais refringente para o meio menos refringente, a velocidade de propagação da luz aumenta e o raio de luz se afasta da normal, para incidência oblíqua.

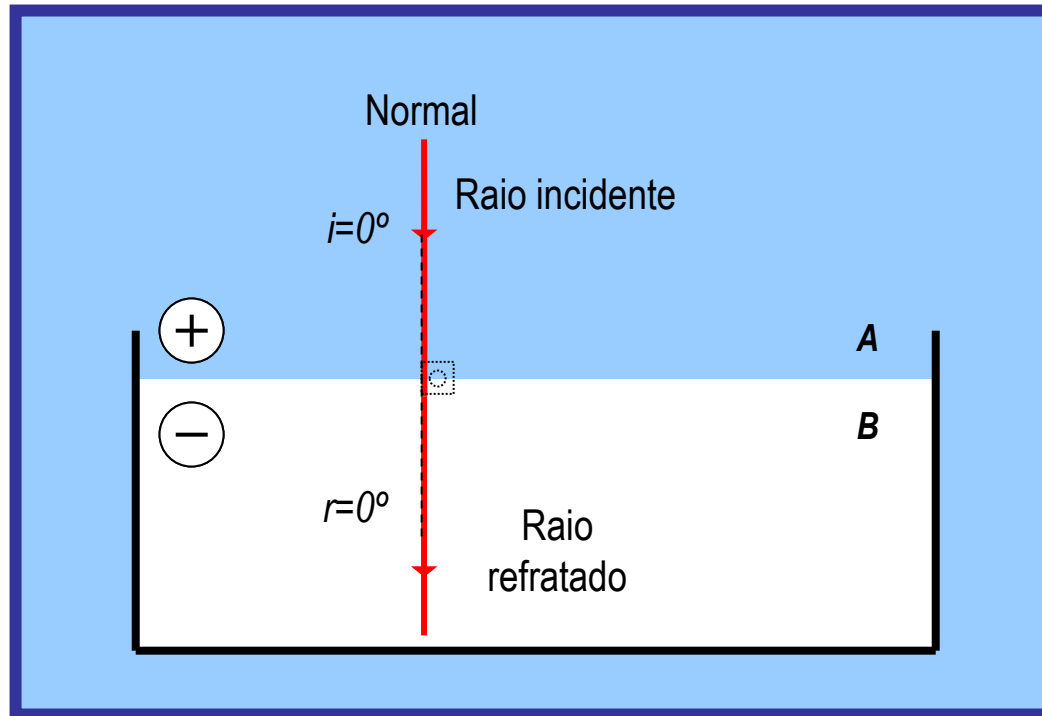


$$+ \Rightarrow - \begin{cases} V_B > V_A \\ \lambda_B > \lambda_A \\ \hat{r} > \hat{i} \text{ (se } \hat{i} \neq 0) \end{cases}$$

Neste caso podemos dizer que o raio refratado afasta-se da normal

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

OBS- Se a luz incidir normalmente à superfície de separação de dois meios, a luz não se desvia.

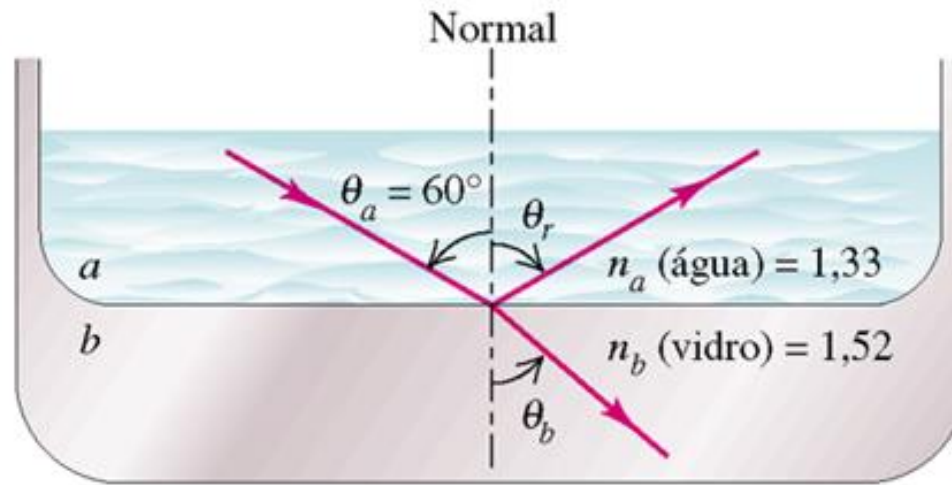


$$+ \Rightarrow - \quad \left\{ \begin{array}{l} V_B > V_A \\ \lambda_B > \lambda_A \\ \hat{r} = \hat{i} = 0^\circ \end{array} \right.$$

Neste caso tivemos uma refração sem desvio

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Exemplo 1: Determine as direção dos raios refletidos e refratados



Raio refletido $\rightarrow \theta_a = \theta_b = 60^\circ$

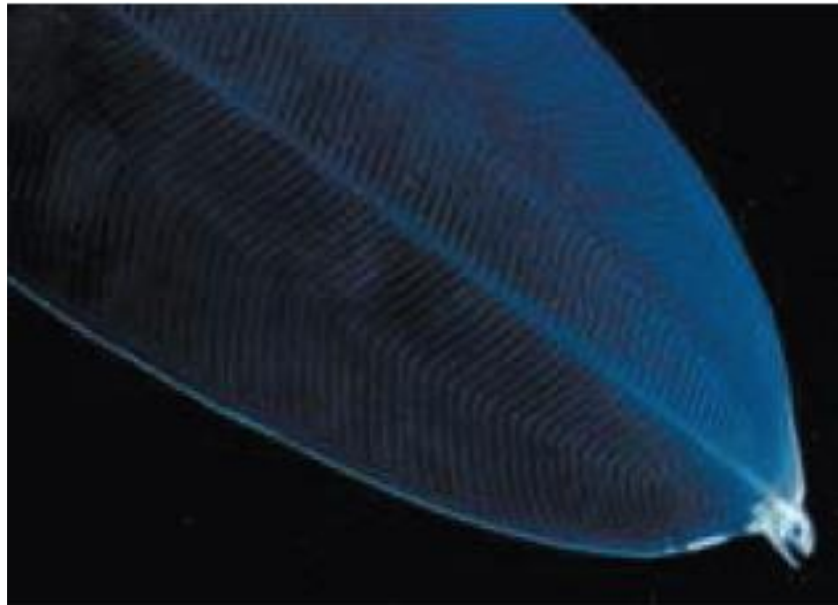
Refração $\rightarrow n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$

$$1,33 \sin 60^\circ = 1,52 \sin \theta_b$$

$$\sin \theta_b = 0,78 \rightarrow \theta_b = 49,3^\circ$$

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

BIO Aplicação Transparência e índice de refração: Uma enguia em seu estágio larval é quase tão transparente como a água do mar na qual ela nada. A larva nesta foto, no entanto, é fácil de ver, porque seu índice de refração é superior ao da água do mar, de modo que uma parte da luz que incide nela é refletida, em vez de transmitida. A larva parece particularmente brilhante em sua volta porque a luz que atinge a câmera a partir desses pontos atingiu a larva em uma incidência rasante ($\hat{i} = 90^\circ$), o que resulta em quase 100% de reflexão.



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Exemplo 2: O comprimento de onda da luz vermelha emitida por um laser hélio-neônio é 633 nm no ar, mas, no humor aquoso no interior do globo ocular, é 474 nm. Calcule o índice de refração do humor aquoso e a velocidade e frequência da luz nesse líquido.

SOLUÇÃO

IDENTIFICAR E PREPARAR: as ideias básicas aqui são (i) a definição do índice de refração n em função da velocidade da onda v em um meio e a velocidade c no vácuo e (ii) a relação entre o comprimento de onda λ_0 no vácuo e o comprimento de onda λ em um meio de índice n . Usamos a Equação $n = c/v$; $\lambda = \lambda_0/n$; e $v = \lambda f$.

EXECUTAR: o índice de refração do ar é aproximadamente igual a 1, de modo que consideramos iguais os comprimentos de onda λ_0 no ar e no vácuo, 633 nm. Portanto, pela Equação 33.5,

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad n = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{633 \text{ nm}}{474 \text{ nm}} = 1,34$$

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

que é aproximadamente igual ao índice de refração da água. Como $n = c/v$ e $v = \lambda f$, encontramos

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,34} = 2,25 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2,25 \times 10^8 \text{ m/s}}{474 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4,74 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

AVALIAR: embora o comprimento de onda e a velocidade possuam valores diferentes no ar e no humor aquoso, a *frequência* no ar, f_0 , é a mesma frequência f no humor aquoso:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{633 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4,74 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Quando a luz passa de um material para outro, a velocidade e o comprimento de onda mudam, mas a frequência da onda não se altera.

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

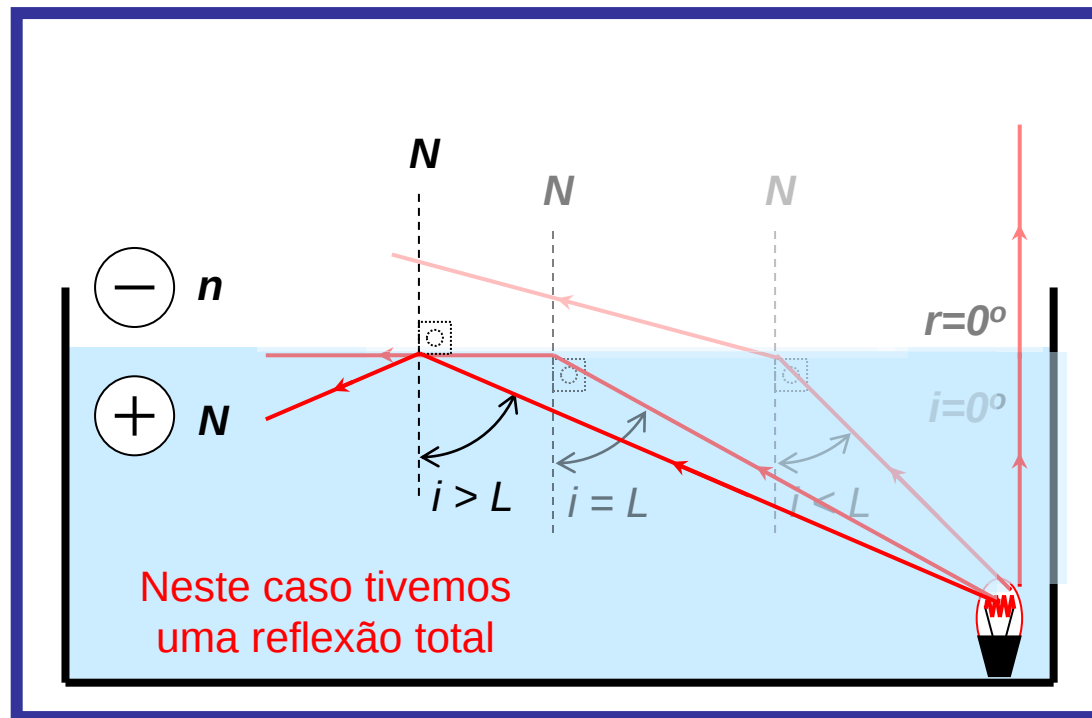
Continuidade Óptica



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

7- ângulo limite e reflexão interna total

a- Reflexão interna total: Para ocorrer **reflexão total** a luz deve se propagar no sentido do meio mais para o meio menos refringente ($n_B > n_A$) o ângulo de incidência i deve superar o ângulo limite L .



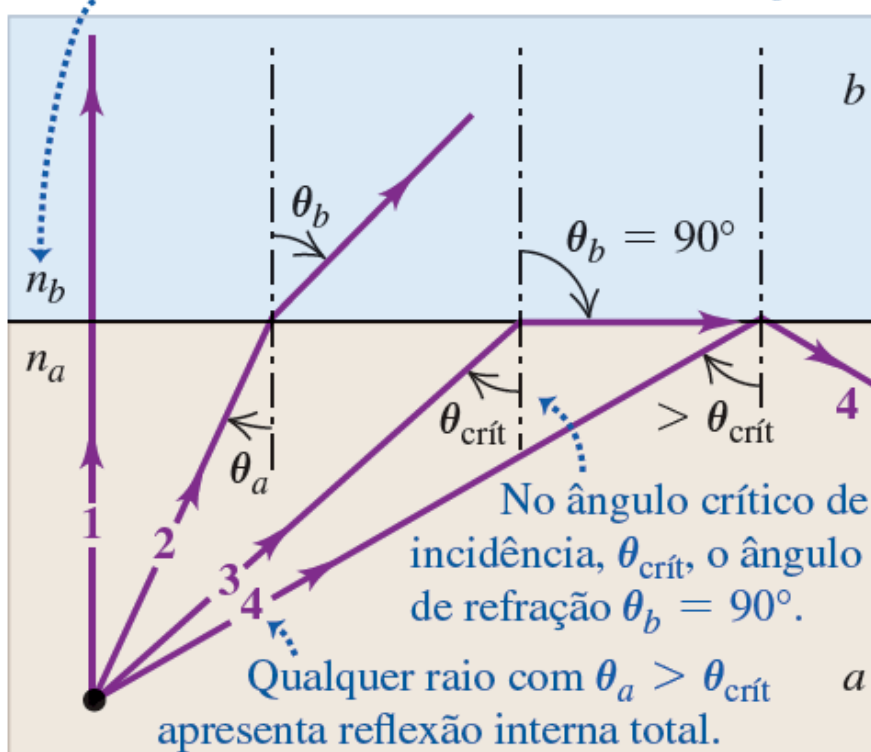
II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ



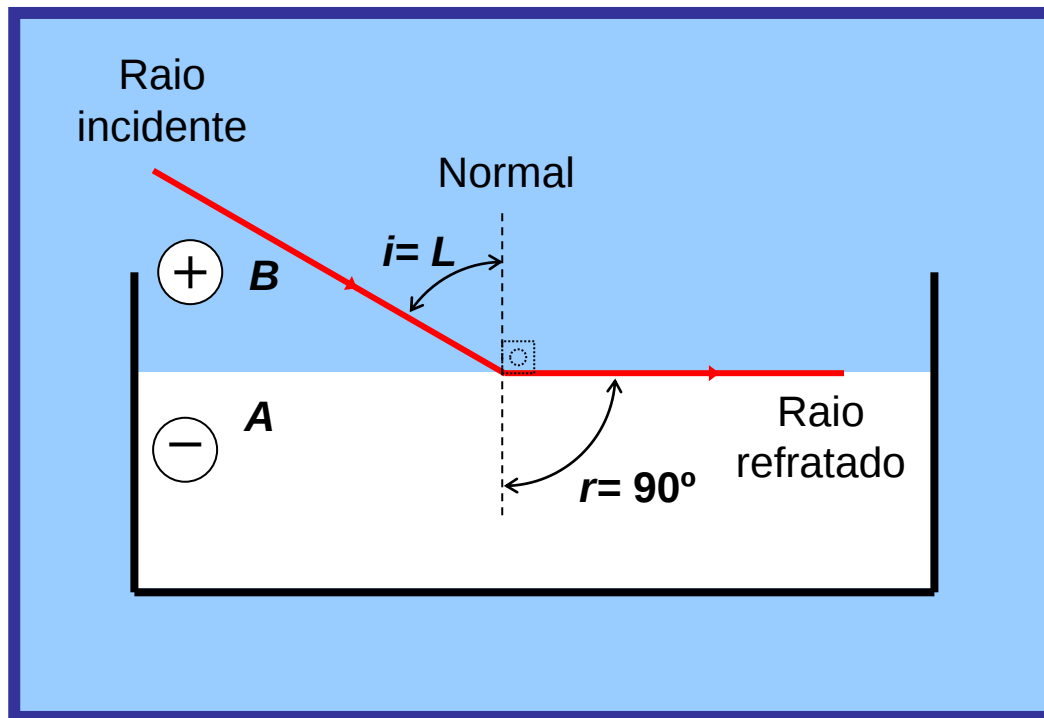
II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

b- Cálculo do ângulo limite (L).

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



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ



$$n_A \cdot \sen 90^0 = n_B \cdot \sen L$$

$$\sen L = \frac{n_A}{n_B}$$

ou

$$\sen L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$$

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Exemplo 3: A reflexão interna total tem muitas aplicações na tecnologia ótica. Como exemplo, considere o vidro com um índice de refração $n = 1,52$. Se a luz que se propaga dentro desse vidro encontra uma interface vidro–ar, o ângulo crítico é

$$\sin \theta_{crít} = \frac{n_{menor}}{n_{maior}} = \frac{1}{1,52} = 0,68$$

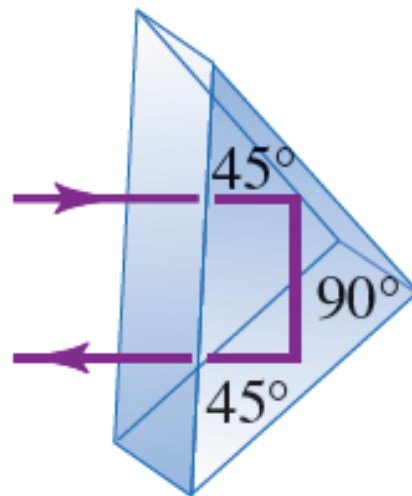
$$\theta_{crít} = 41,1^\circ$$

A luz que se propaga no interior do vidro será *totalmente refletida* quando ela incidir sobre a interface vidro–ar em um ângulo igual ou superior a $41,1^\circ$.

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Sendo o ângulo crítico ligeiramente menor que 45° , podemos usar um prisma com ângulos 45° , 45° e 90° como uma superfície totalmente refletora. Como

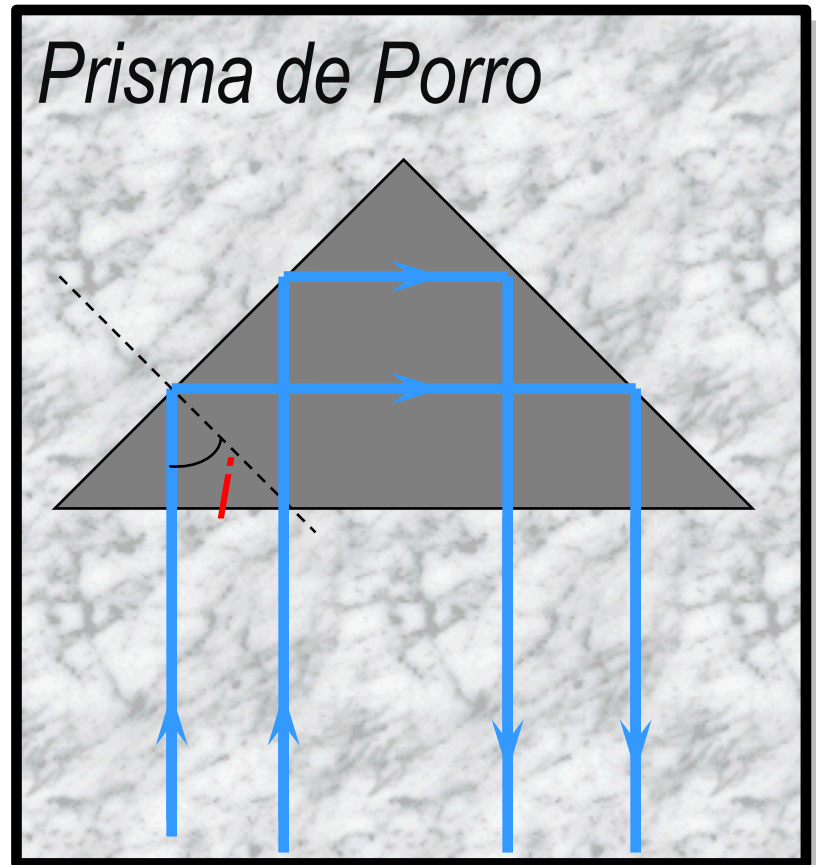
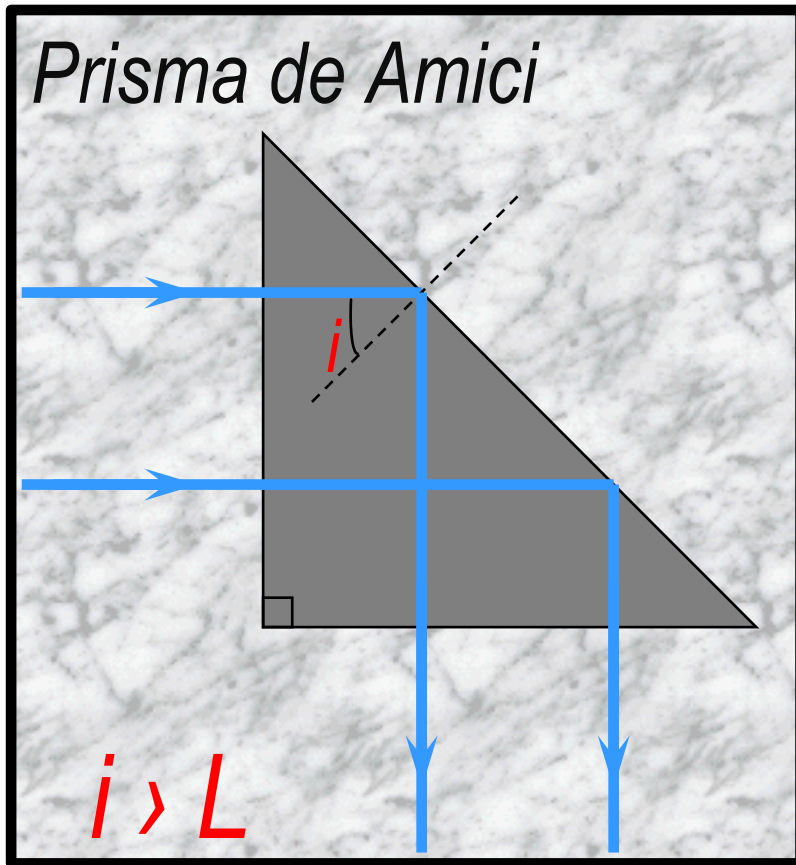
Reflexão interna total em um prisma de Porro



Se o feixe incidente for orientado como mostrado, a reflexão interna total ocorre nas faces que formam 45° com a superfície em que o raio incide (porque, em uma interface vidro-ar, $\theta_{\text{crít}} = 41,1$).

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

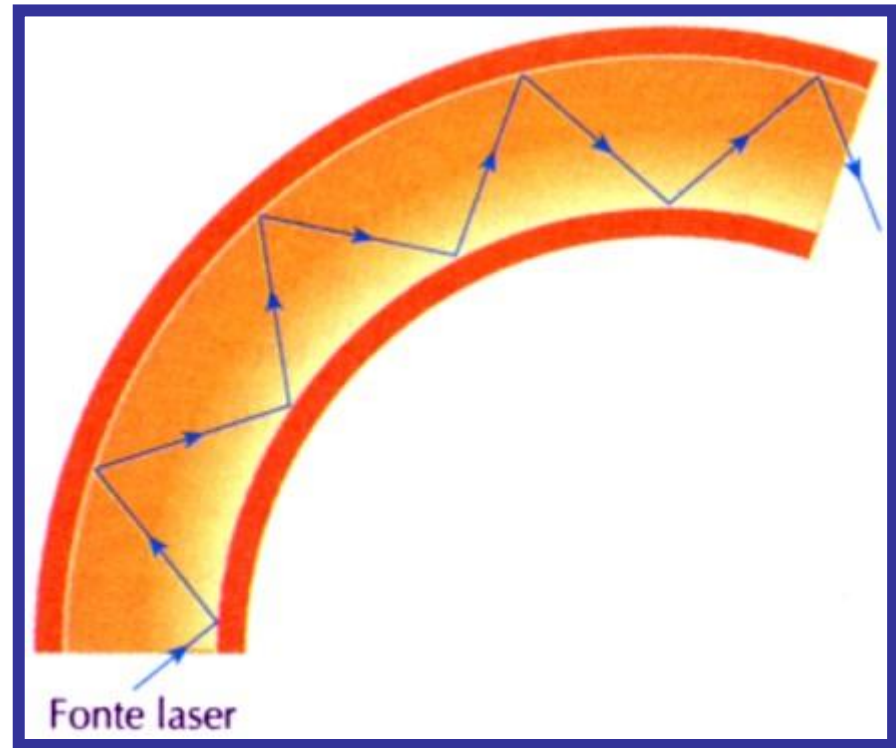
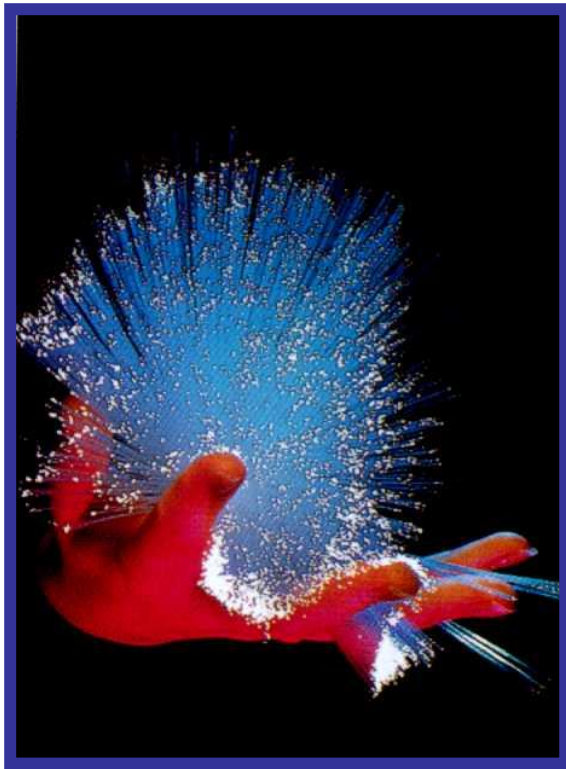
Prismas de Reflexão Total



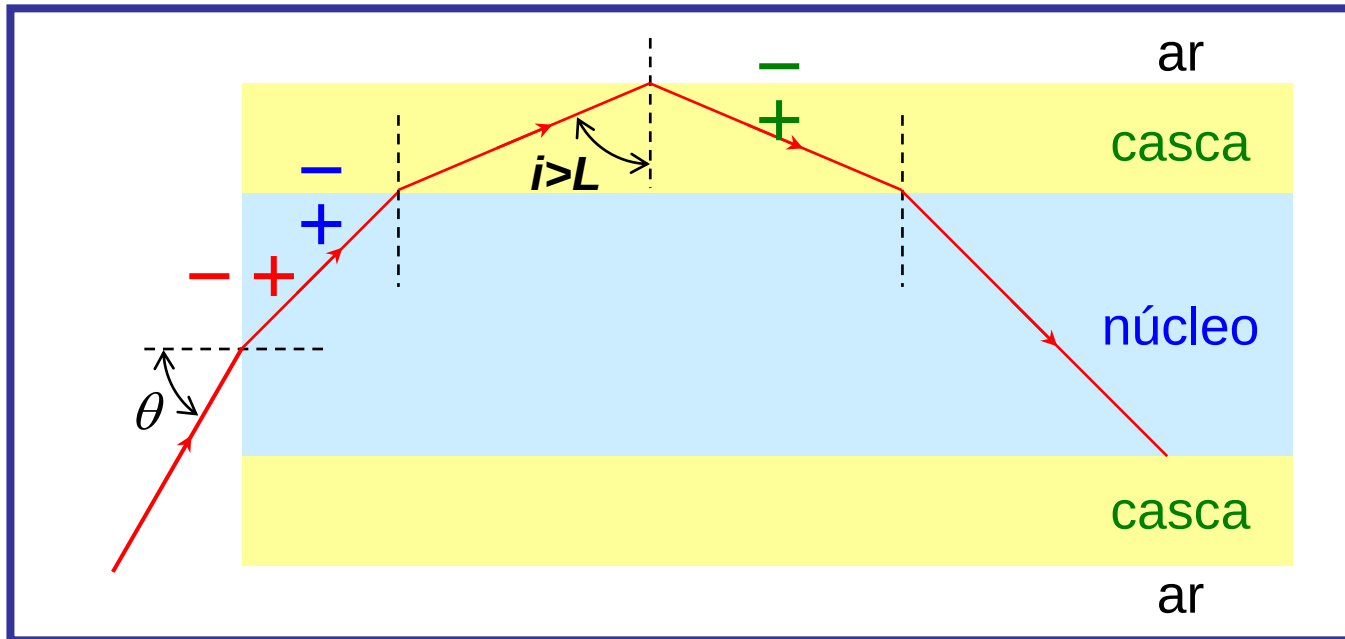
II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

8. Aplicação da reflexão total

Fibra Ótica

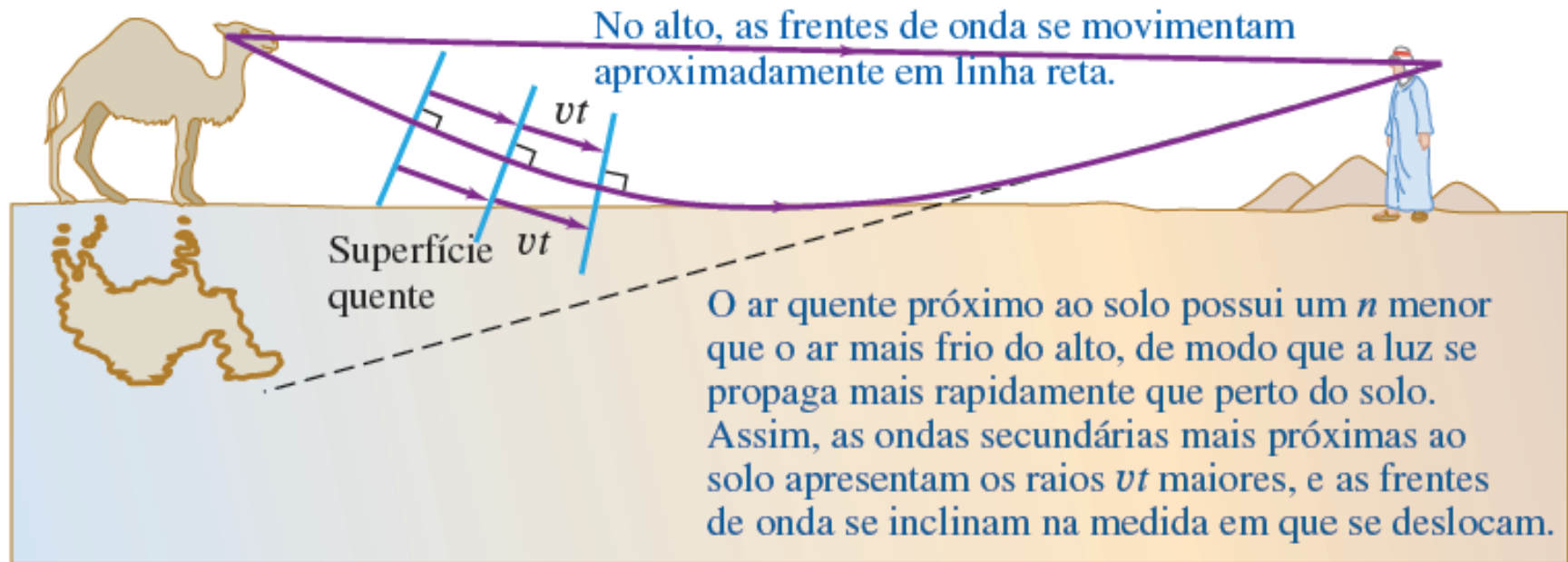


FUNCIONAMENTO DA FIBRA ÓTICA



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Miragem

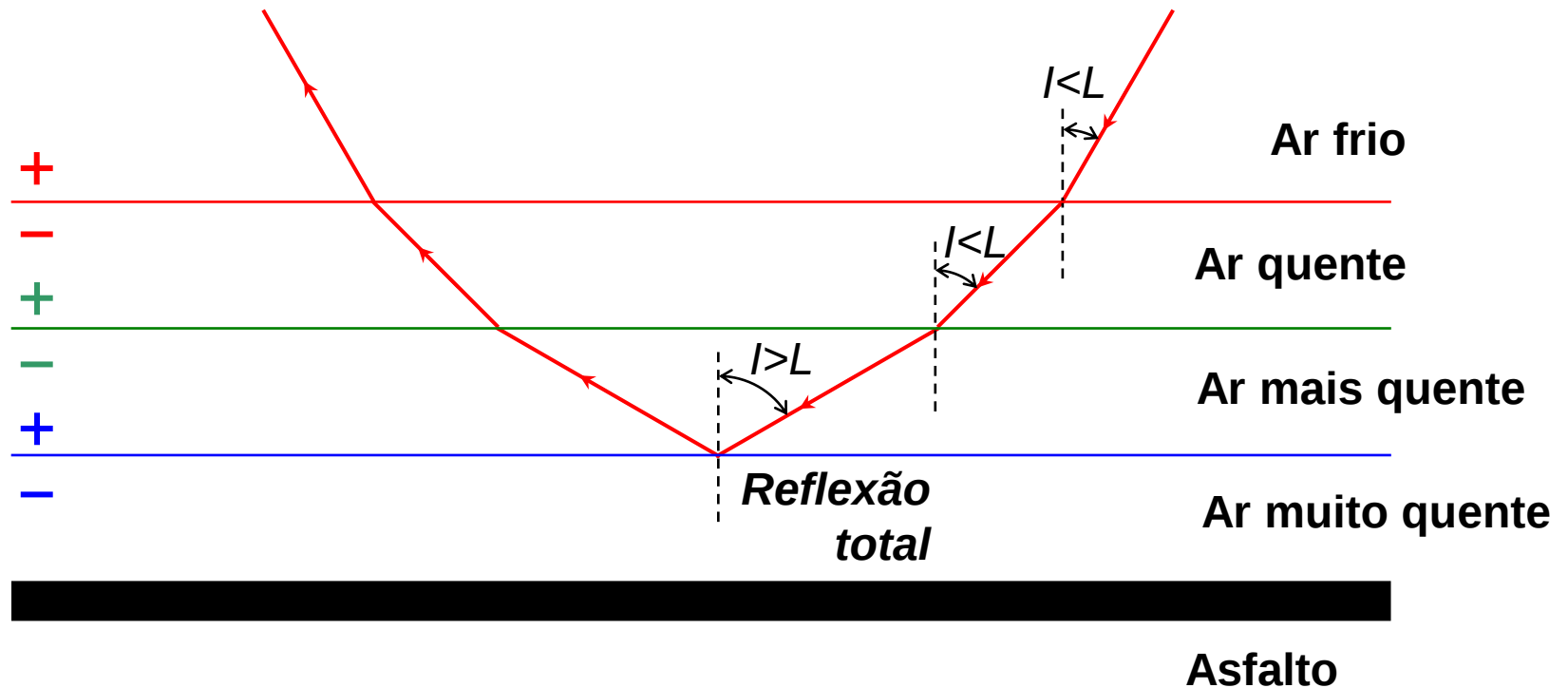


II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ



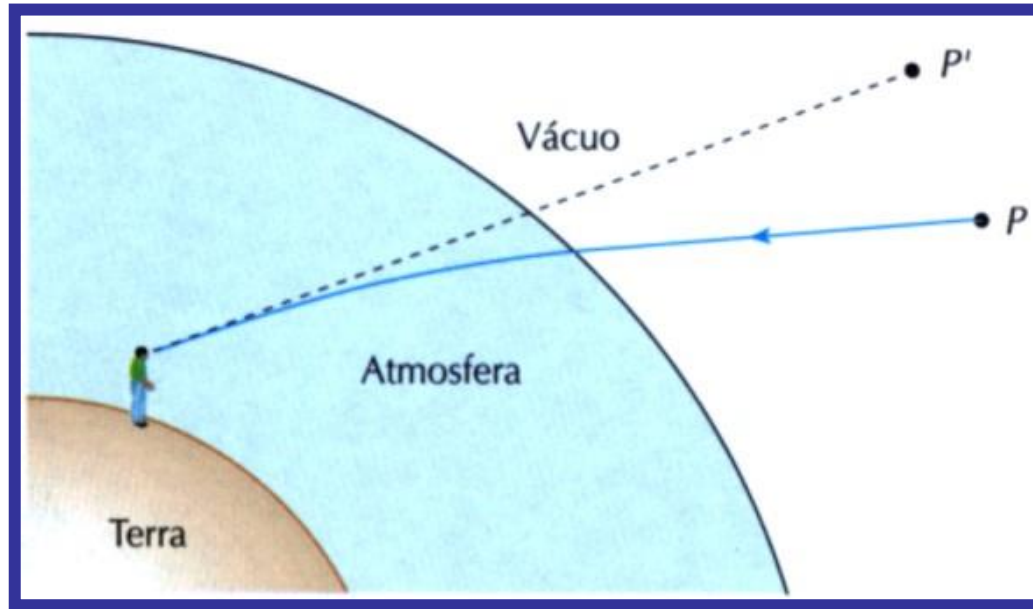
II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Miragem



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

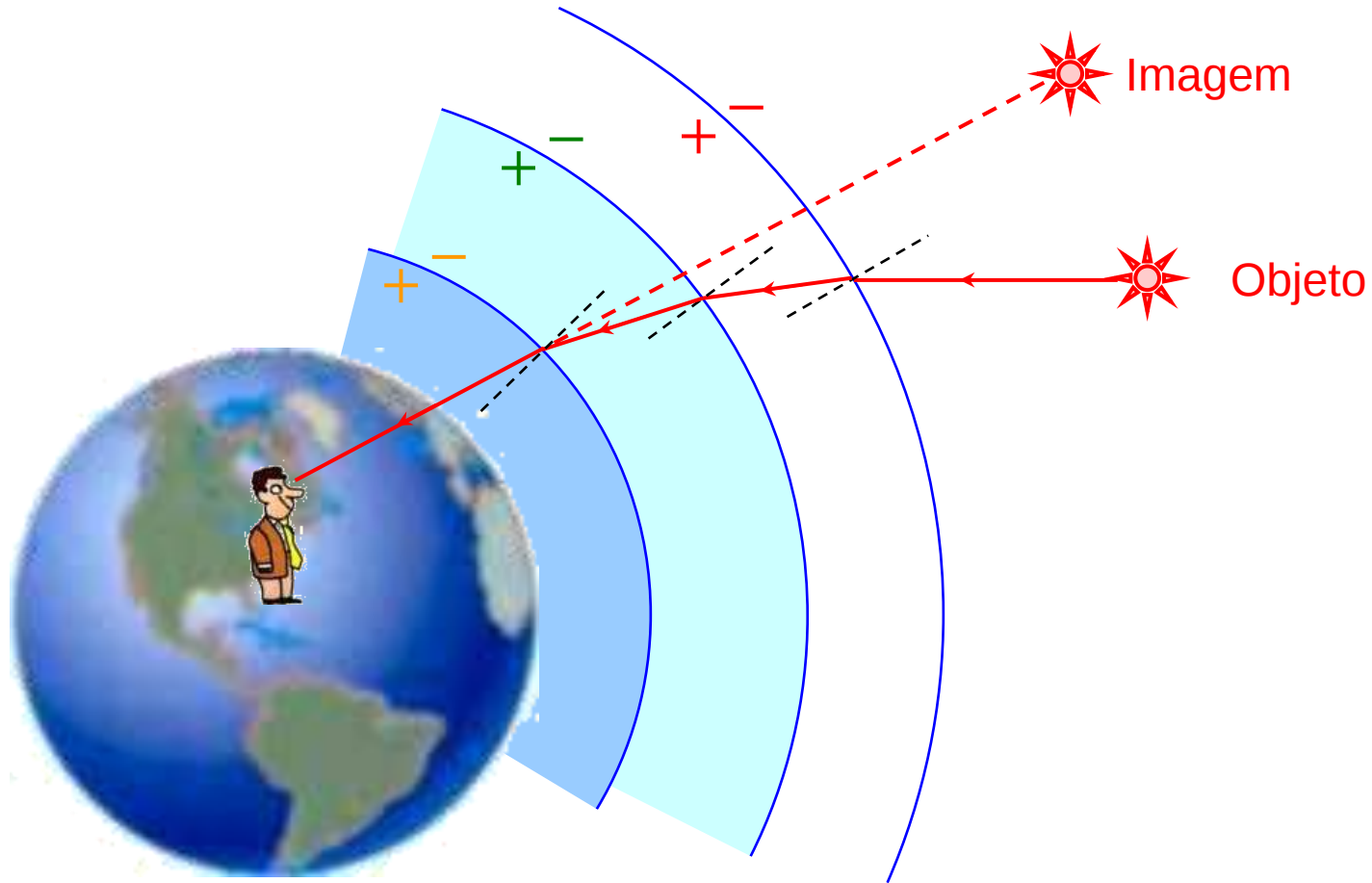
Altura aparente dos astros



A densidade do ar diminui com a altura

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

A densidade do ar diminui com a altura. Observe esquema a seguir:



II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Exemplo 4: O periscópio de um submarino usa dois prismas com ângulos 45° - 45° - 90° , que produzem reflexão interna total nas faces adjacentes aos ângulos de 45° . Explique por que o periscópio deixa de funcionar se ocorrer um vazamento e o prisma inferior ficar imerso na água.

O ângulo crítico para uma interface entre a água ($n_b = 1,33$) e o vidro ($n_a = 1,52$) é

$$\sin \theta_{crít} = \frac{n_{menor}}{n_{maior}} = \frac{1,33}{1,52} = 0,875 \qquad \theta_{crít} = 61^\circ$$

O ângulo de incidência de 45° sobre um prisma com reflexão total é menor que o ângulo crítico de 61° ; logo, não ocorre reflexão interna total na interface entre a água e o vidro. A maior parte da luz é transmitida para a água e uma porção muito pequena é refletida de volta para dentro do prisma.

II - REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Exemplo 5: Em qual das seguintes situações há reflexão interna total?

- (i) Luz se propagando na água ($n = 1,33$) incide em uma interface água–ar com um ângulo de incidência de 70° ;
- (ii) luz se propagando no vidro ($n = 1,52$) atinge uma interface vidro–água com um ângulo de incidência de 70° ;
- (iii) luz se propagando na água atinge uma interface água–vidro com um ângulo de incidência de 70° .

III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

1- Luz monocromática e Luz policromática

a- Luz Monocromática: constituída de uma única cor, como por exemplo a luz monocromática amarela emitida pelo vapor de sódio, nas lâmpadas.

b- Luz policromática: constituída de duas ou mais cores, como por exemplo a luz branca do Sol.

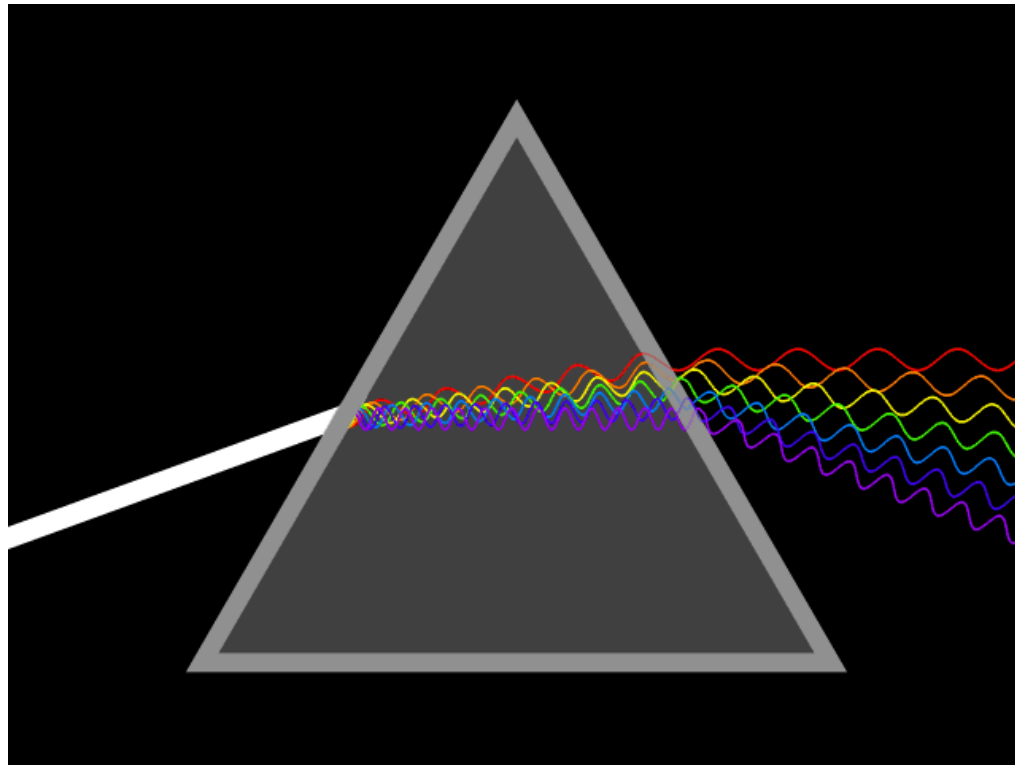
A luz do sol (ou das lâmpadas comuns) é chamada de **luz branca**, pois ao incidir sobre uma das faces de um prisma de vidro, decompõe-se em sete cores fundamentais: vermelha, alaranjada, amarela, verde, azul, anil e violeta.

III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

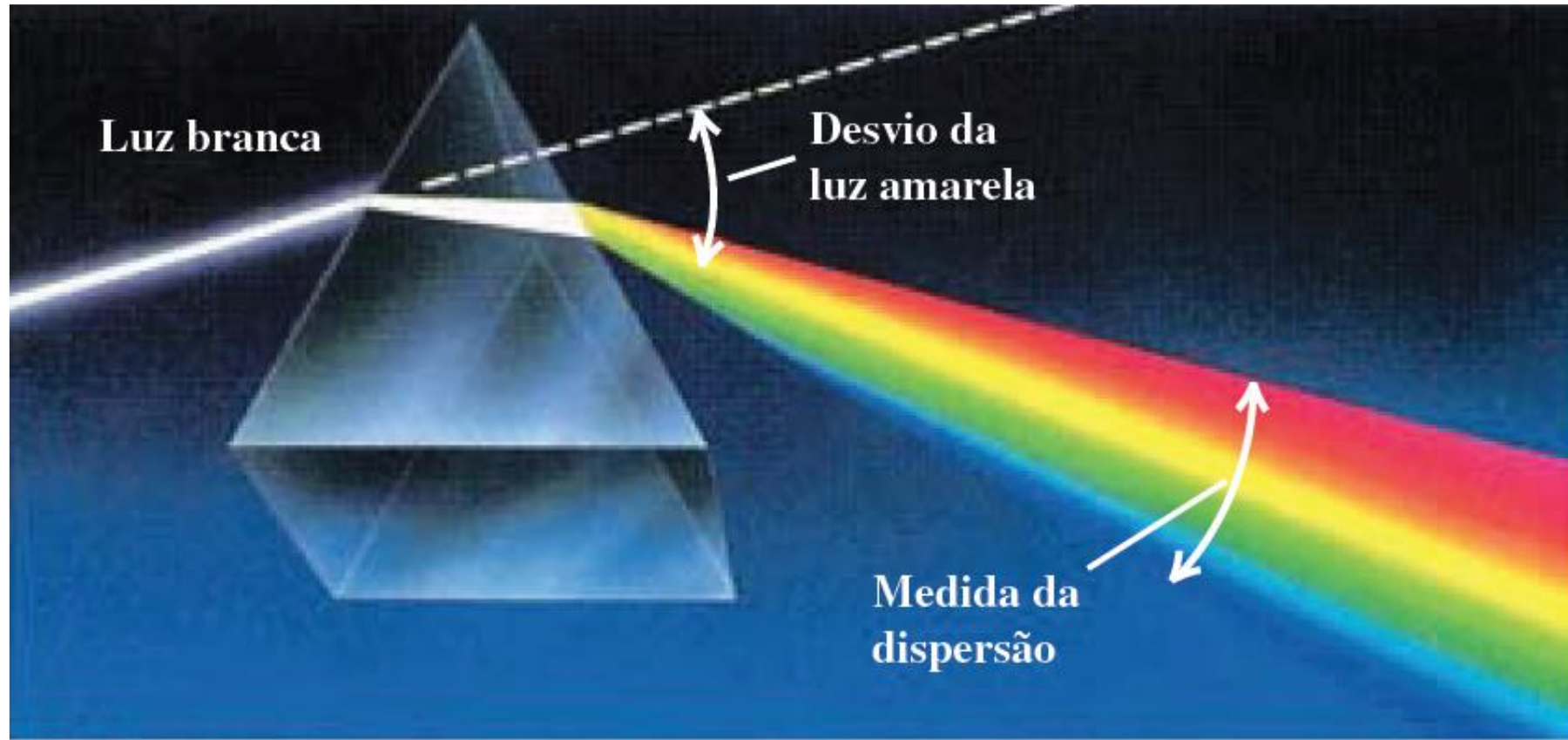
2. Dispersão

- A luz branca comum é uma superposição de ondas cujos comprimentos abrangem todo o espectro visível.
- A velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os comprimentos de onda, mas, no interior de um material, ela varia com o comprimento de onda.
- 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.

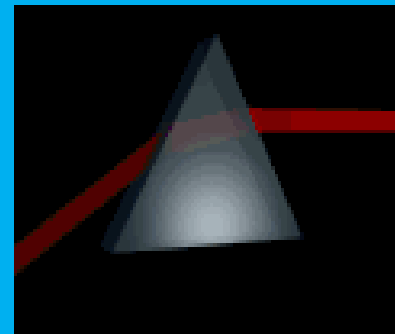
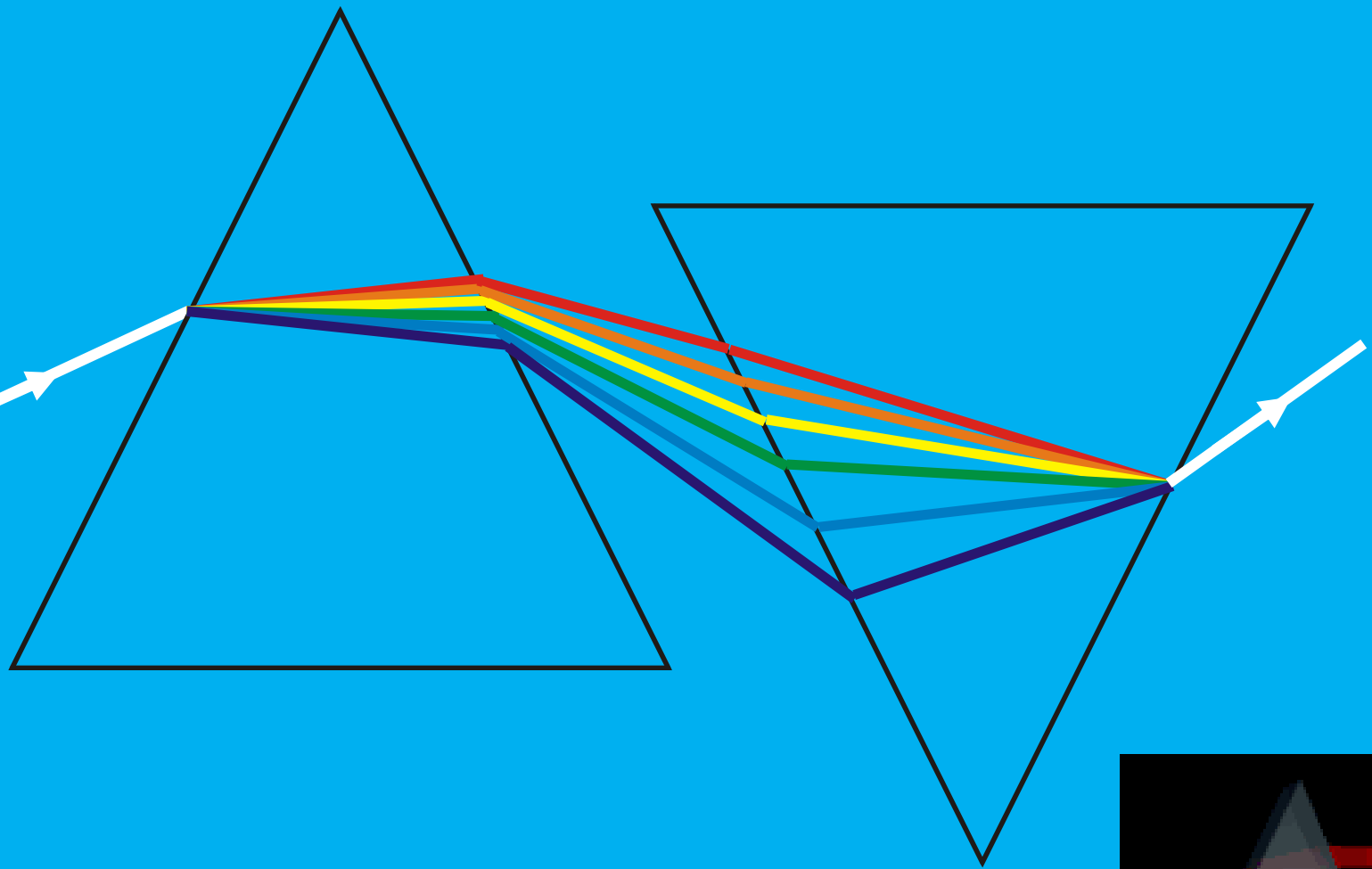
III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA



III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA



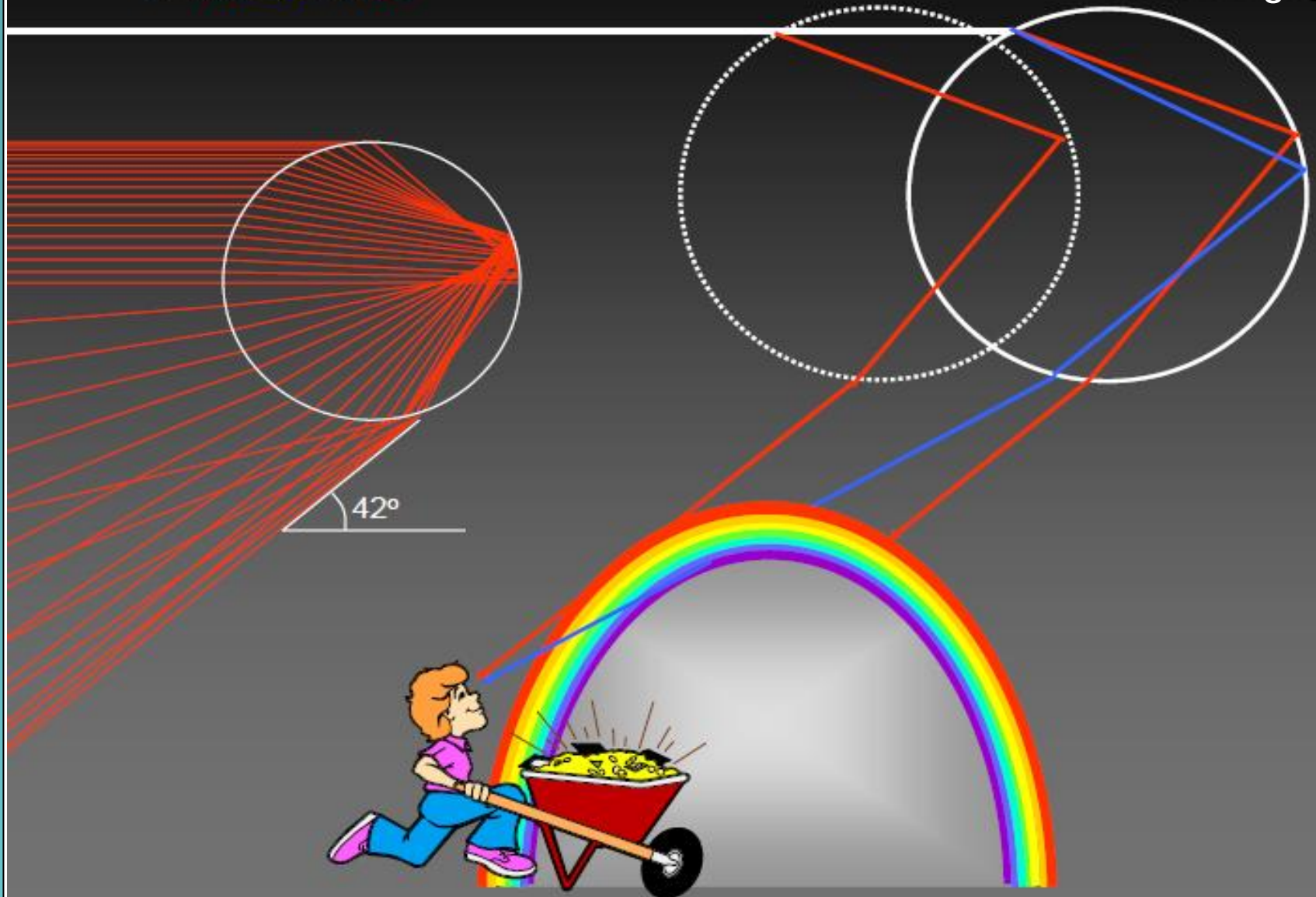
III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA



III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

O Arco-Íris

Gota de água



III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

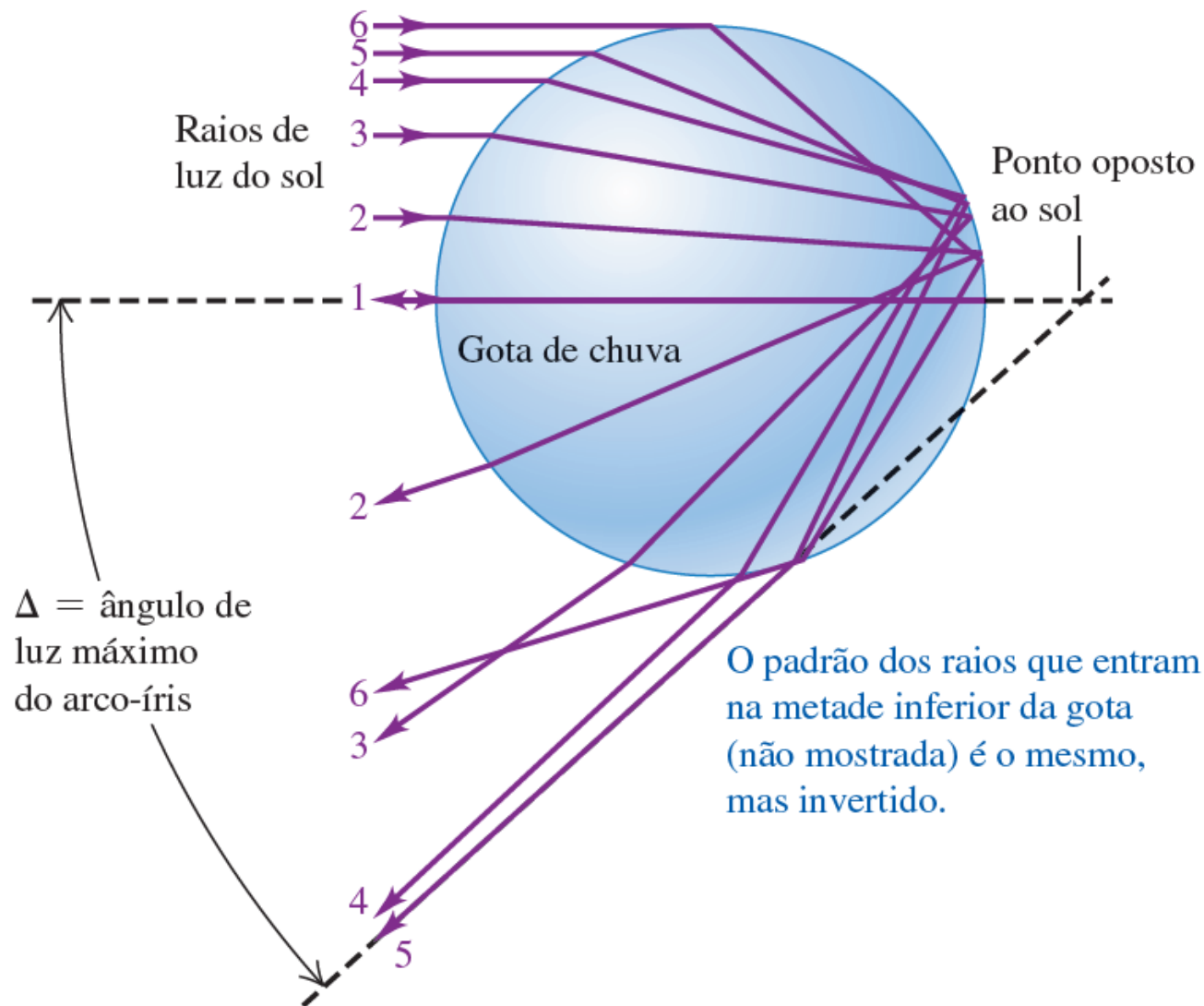
3. Arco ires duplo



III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

3. Arco íres (a)

As trajetórias dos raios de luz entrando na parte superior de um arco-íris



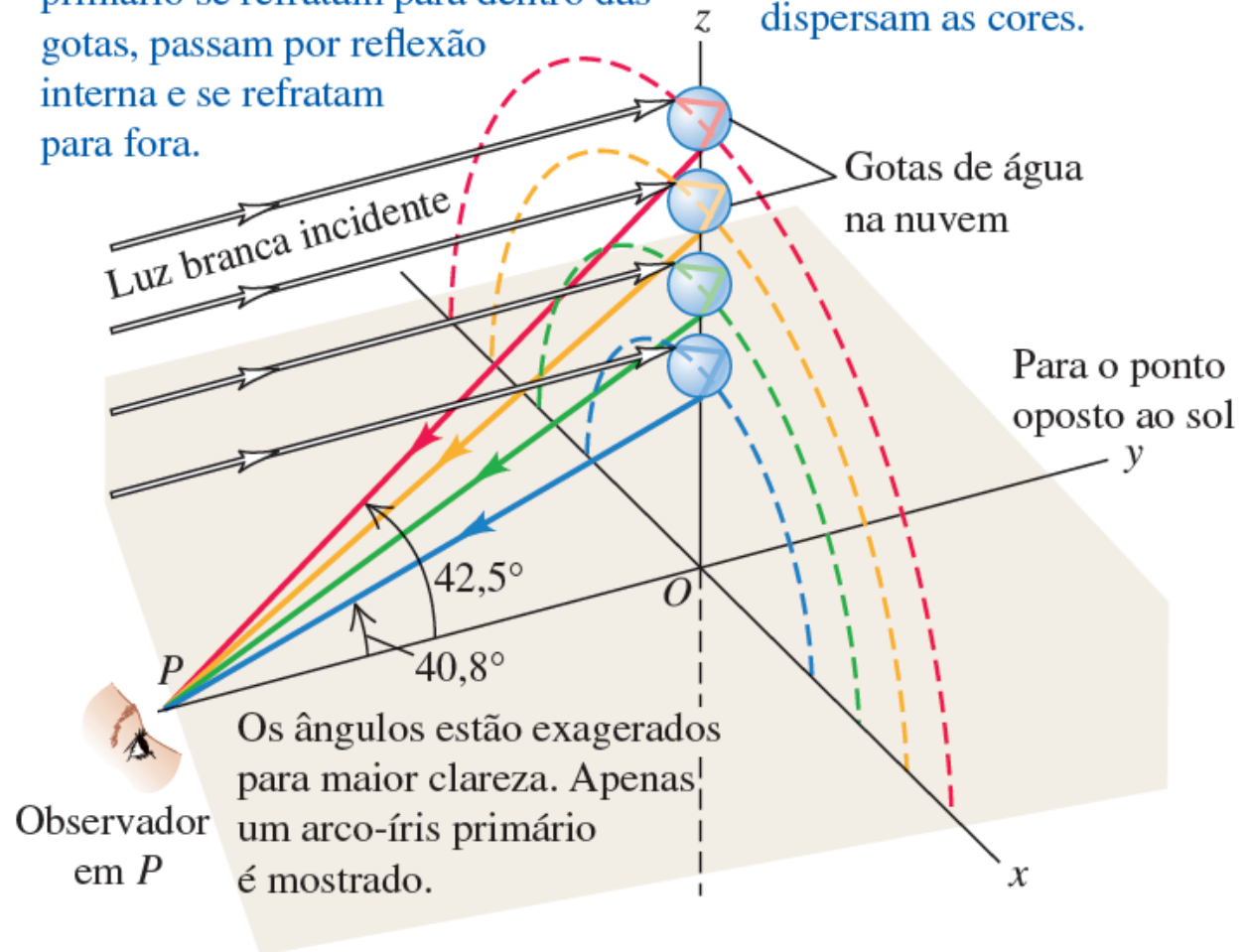
III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

3. Arco íres (b)

Formando um arco-íris. 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.

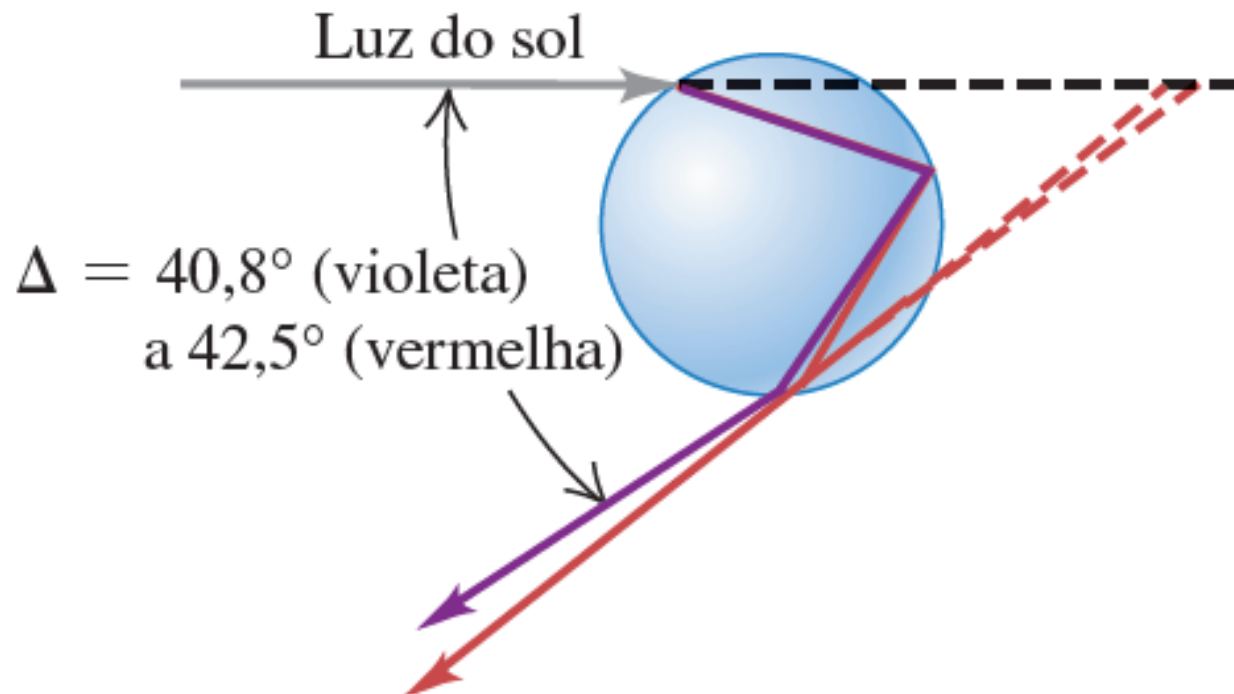
As duas refrações dispersam as cores.



III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

3. Arco íris (c)

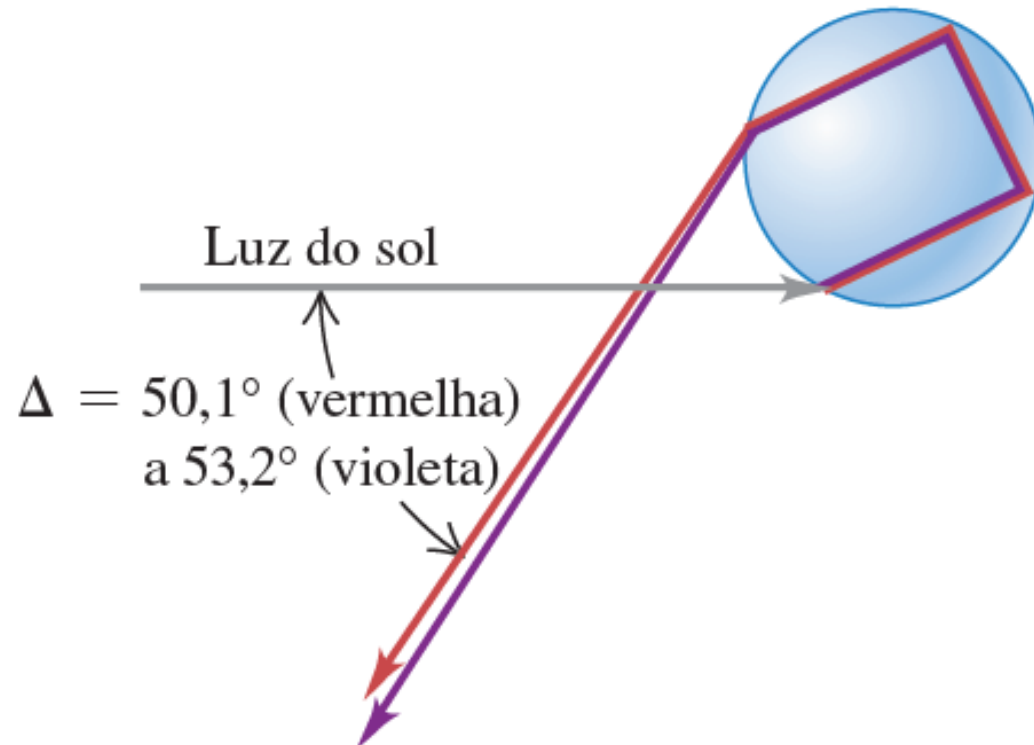
Um arco-íris primário é formado por raios que passam por duas refrações e uma reflexão interna. O ângulo Δ é maior para a luz vermelha que para a luz violeta.



III – DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

3. Arco íris (d)

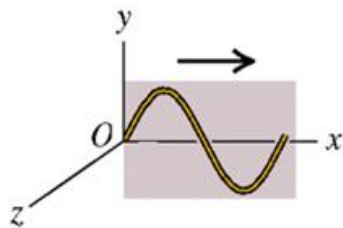
Um arco-íris secundário é formado por raios que passam por duas refrações e duas reflexões internas. O ângulo Δ é maior para a luz violeta que para a luz vermelha.



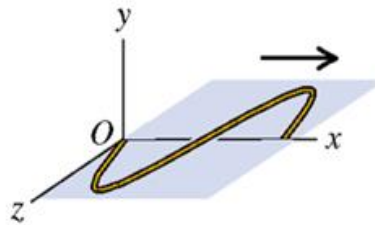
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

1. Polarização

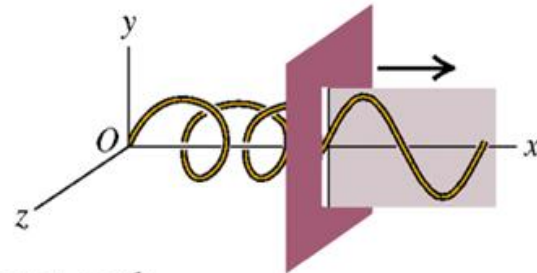
Uma onda natural (não polarizada) é aquela que possui várias direções de vibração, em relação a direção de propagação. Polarizar uma onda é fazê-la vibrar em uma única direção. A polarização é exclusiva das ondas transversais, não ocorrendo esse fenômeno com as ondas longitudinais.



(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.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

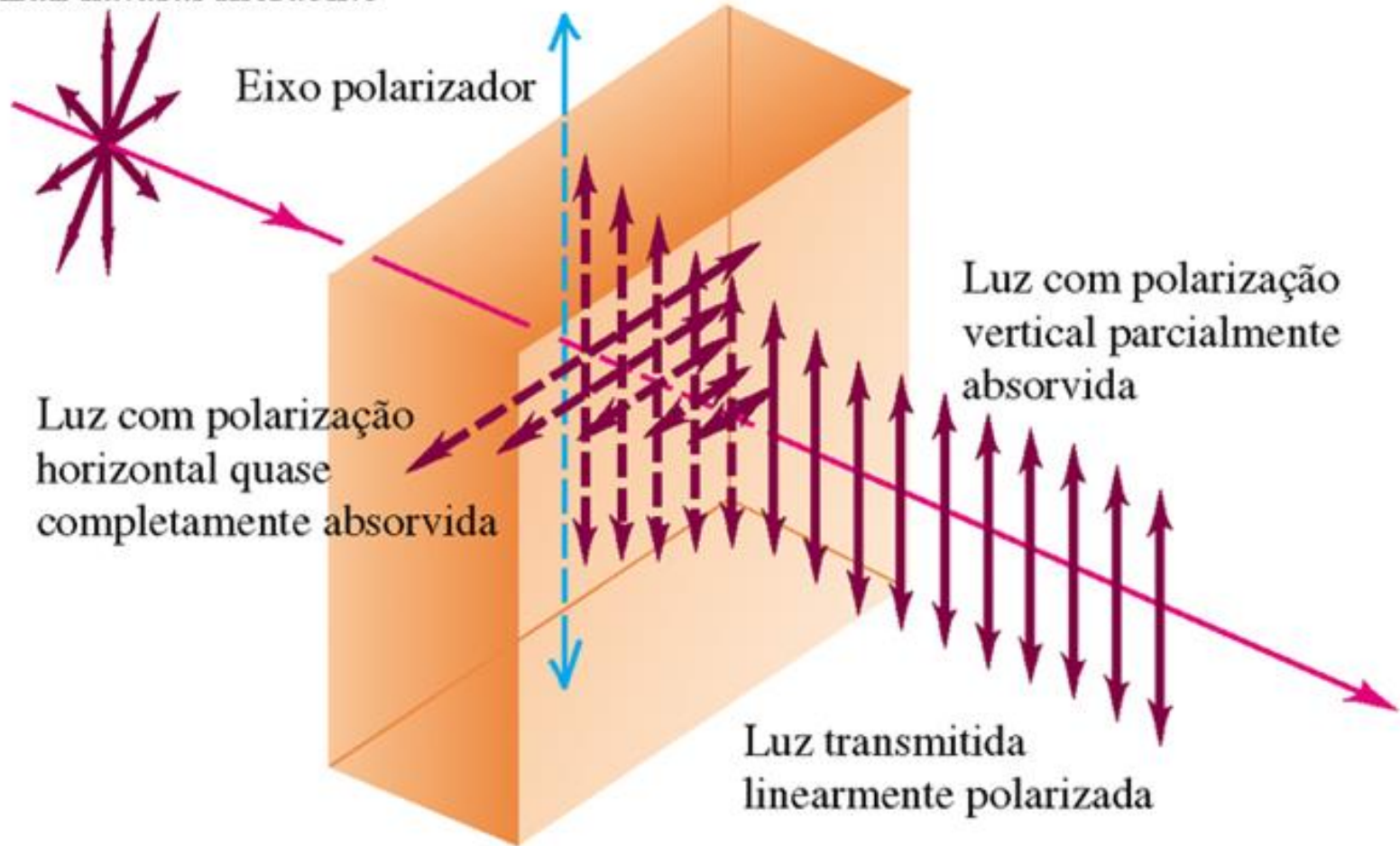
Luz natural incidente

Eixo polarizador

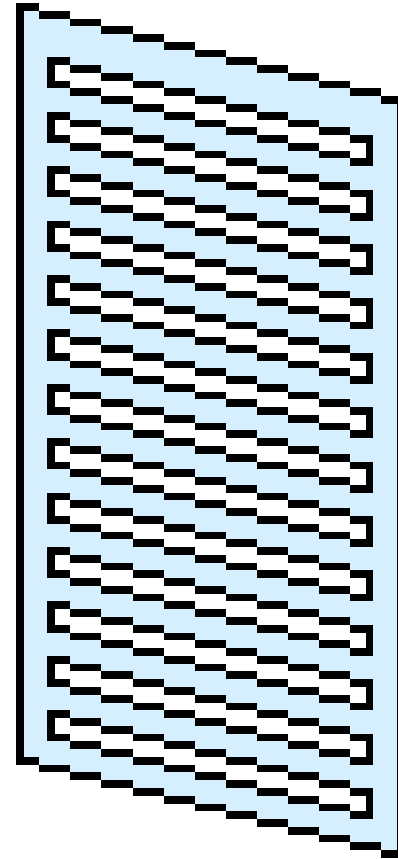
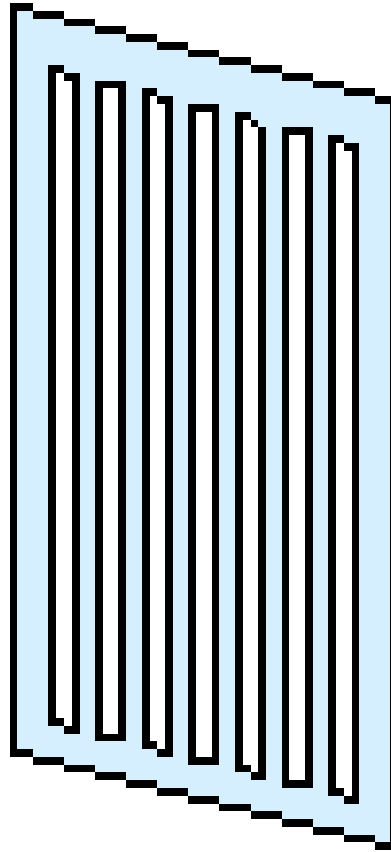
Luz com polarização horizontal quase completamente absorvida

Luz com polarização vertical parcialmente absorvida

Luz transmitida linearmente polarizada



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



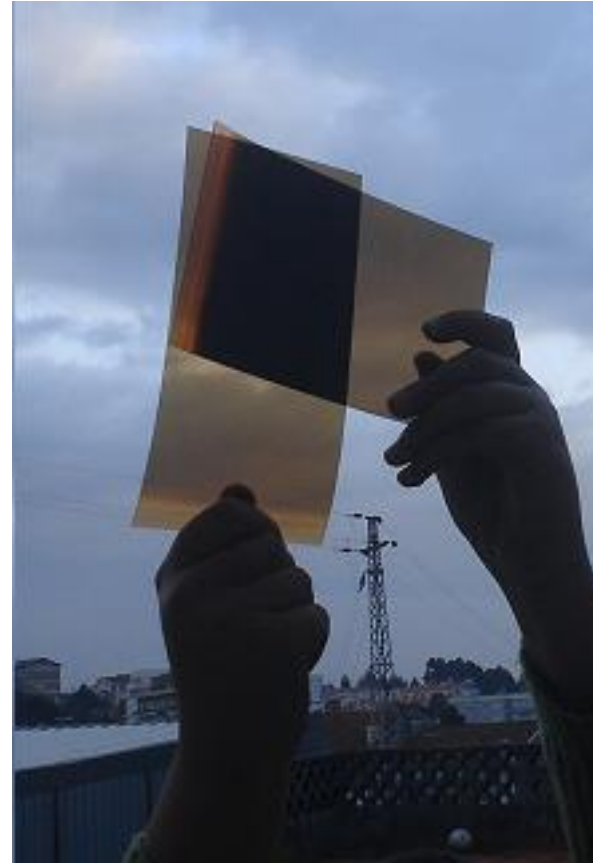
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Pode obter-se facilmente luz polarizada utilizando placas polaroide.

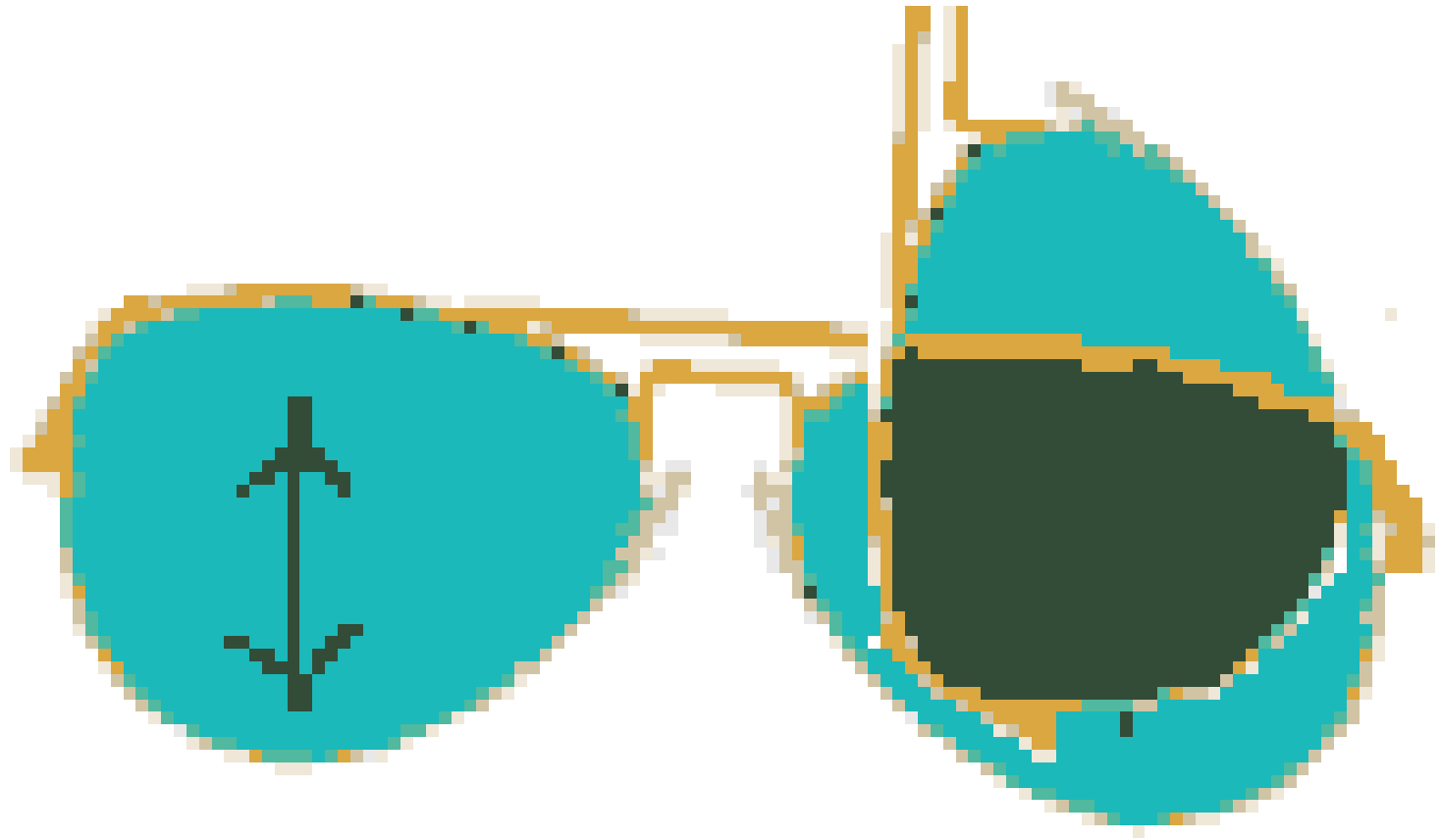


Duas placas cruzadas não deixam passar a luz.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



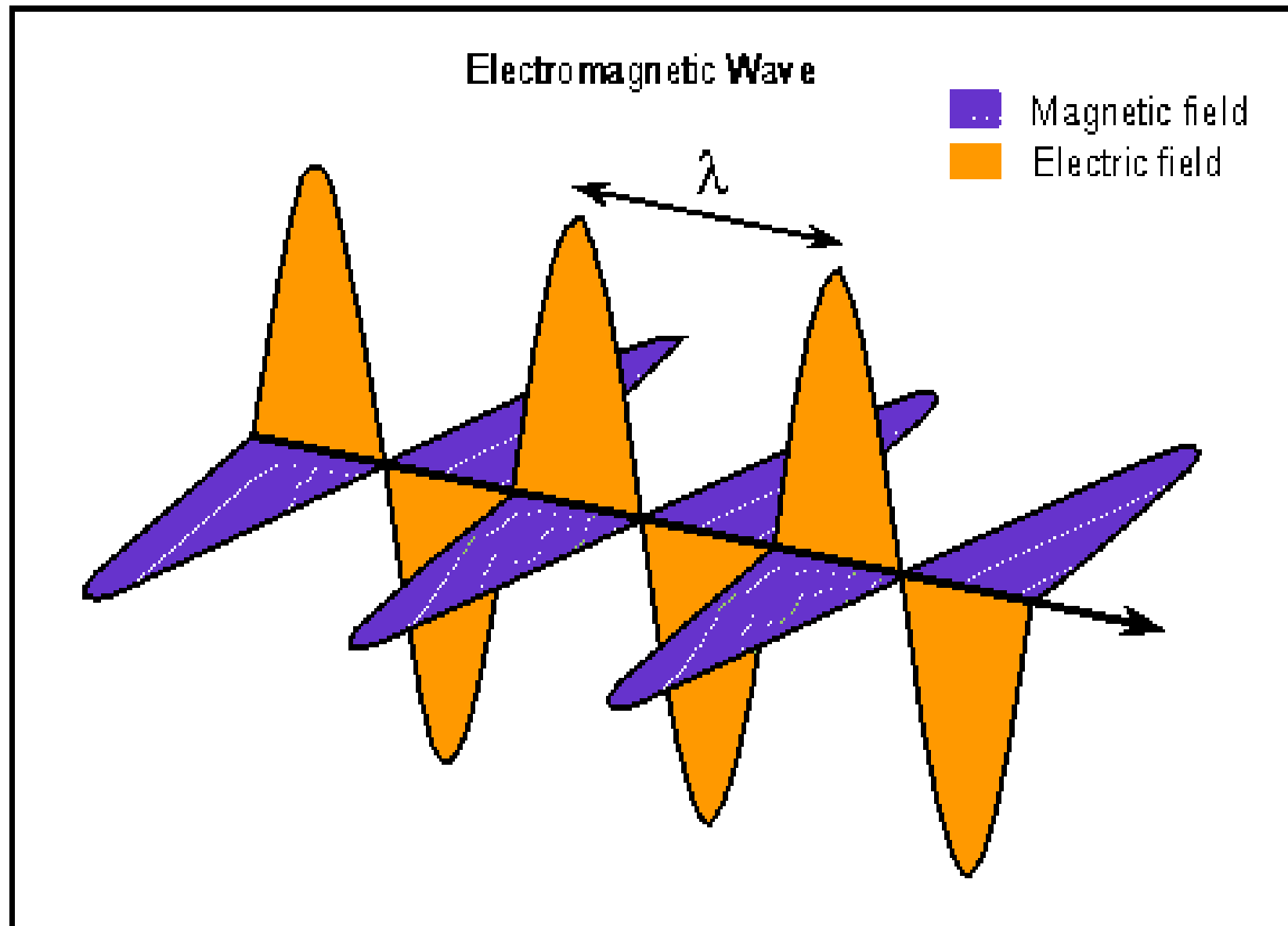
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



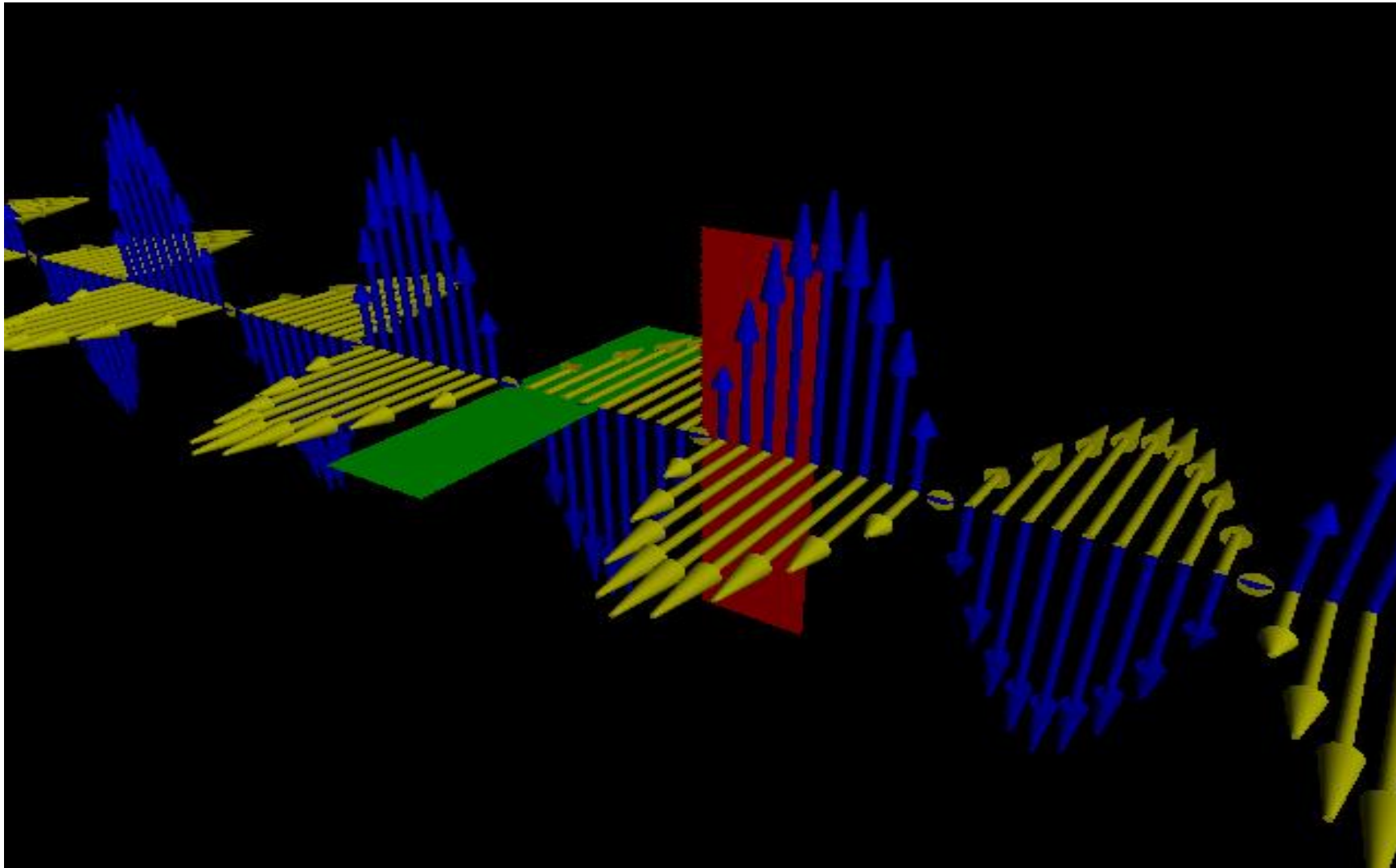
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

- A polarização é uma característica de todas as ondas eletromagnéticas.
- Qualquer onda eletromagnética é uma onda transversal;
- Os campos elétricos e magnéticos flutuam em direções perpendiculares à direção de propagação da onda e em direções perpendiculares entre si.
- Sempre definiremos a direção de polarização de uma onda eletromagnética como a direção do vetor campo elétrico;
- Quase todos os detectores de ondas eletromagnéticas funcionam pela ação da força elétrica sobre os elétrons do material, e não pela ação da força magnética.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



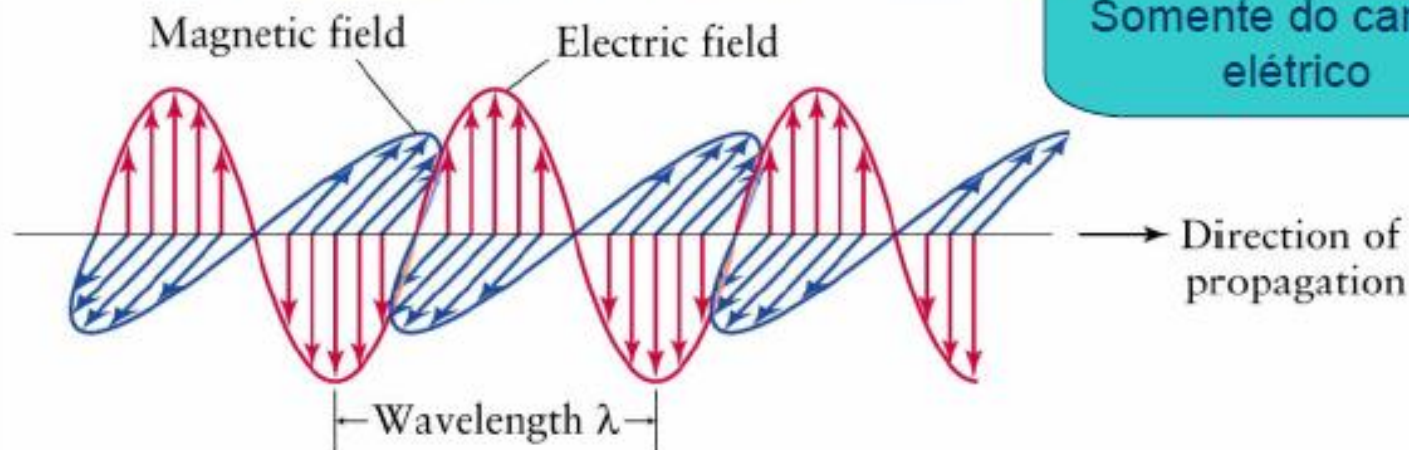
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

- A luz é formada por um campo elétrico e magnético transversais e variantes no tempo
 - A variação de E gera B

Por conta disto, vamos Falar, daqui por diante, Somente do campo elétrico



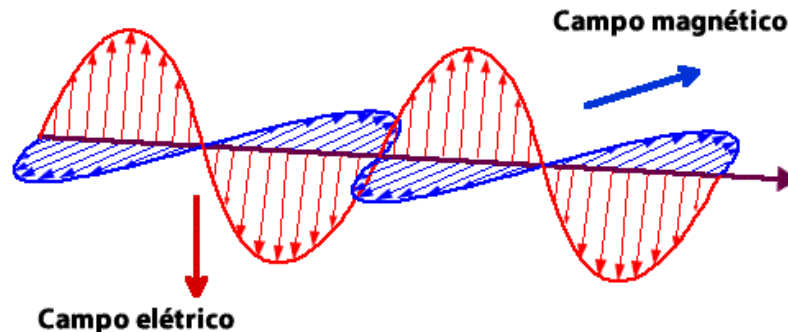
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

2. Descrição de uma onda progressiva

Define-se a **direção de polarização** da onda eletromagnética (OEM) como a **direção do vetor campo elétrico**, ao qual a maioria dos detectores de radiação eletromagnéticas são sensíveis. Exemplo:

$$E_y(x, t) = E_{máx} \cos(kx - \omega t)$$
$$B_z(x, t) = B_{máx} \cos(kx - \omega t)$$

OEM polarizada na direção y. O campo elétrico tem apenas componente y.



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

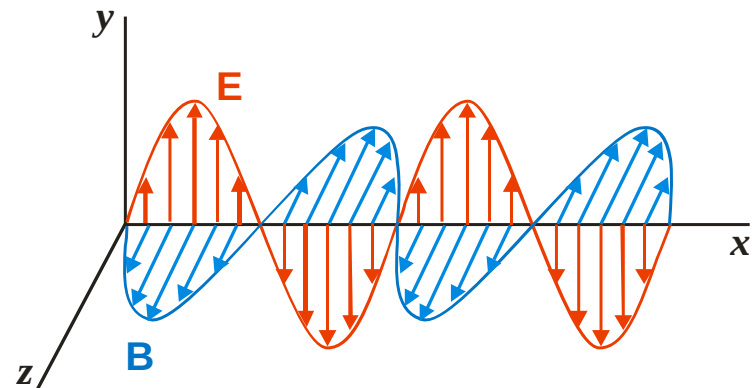
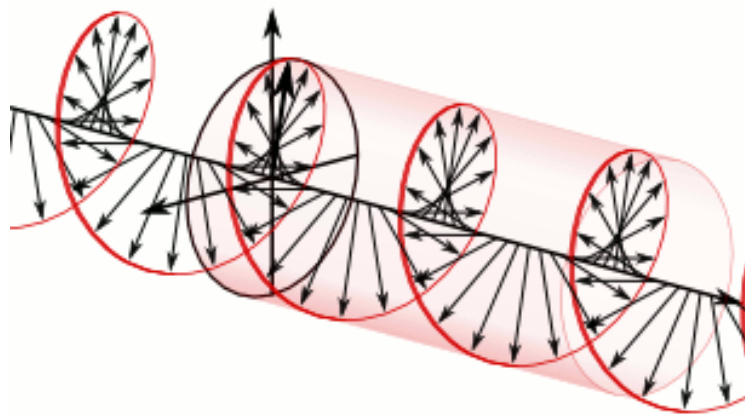
Podemos escrever as funções de onda usando vetores:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x, t) &= \hat{j} E_{máx} \cos(kx - \omega t) \\ \vec{B}(x, t) &= \hat{k} B_{máx} \cos(kx - \omega t)\end{aligned}$$

No vácuo, todas as OEM possuem a mesma velocidade $c \cong 3.10^8$ m/s

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

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



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

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

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

As curvas senoidais da figura acima representam valores instantâneos dos campos elétricos e magnéticos em função de x . A medida que o tempo passa, a onda se desloca para a direita com velocidade c . Em qualquer ponto, as oscilações senoidais de E e B estão em fase.

As amplitudes devem ser relacionadas por $E_{máx} = cB_{máx}$

$$\frac{E}{B} = c \rightarrow \text{razão entre os módulos}$$

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

3. Filtros polarizadores

- As ondas produzidas por uma emissora de rádio são, em geral, linearmente polarizadas. A antena vertical de um telefone celular emite ondas contidas em um plano horizontal em torno da antena e que são polarizadas em uma direção vertical (paralela à antena).



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

- Para a luz visível, a situação é diferente. As fontes comuns, como uma lâmpada incandescente ou fluorescente, emitem luz que não é polarizada.
- Qualquer fonte de luz contém um número extremamente grande de moléculas com orientações caóticas, é chamada de luz natural ou luz não polarizada.



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

- Os filtros usados para polarizar ondas eletromagnéticas apresentam diferentes detalhes de construção, que dependem do comprimento de onda.
- Para micro-ondas com comprimentos de onda da ordem de alguns centímetros, um bom filtro polarizador é uma grade de fios condutores próximos e paralelos, isolados entre si e igualmente espaçados.
- No caso da luz visível, o filtro polarizador mais comum é conhecido como polaroide — nome derivado da marca registrada Polaroid —, amplamente usado em óculos de sol e como filtros polarizadores em câmeras fotográficas.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

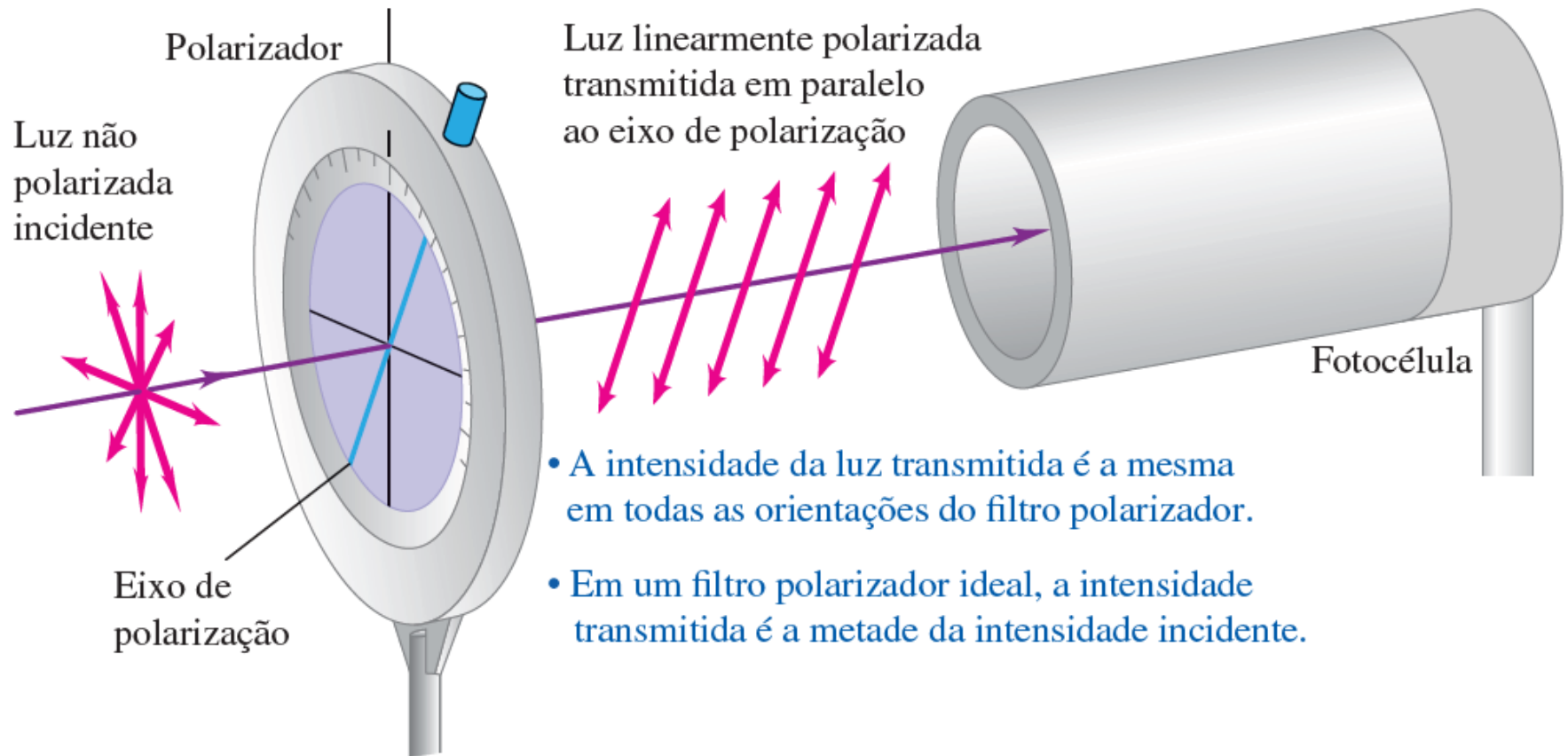
- Esse material apresenta uma propriedade chamada de **dicróismo**, uma absorção seletiva na qual um dos componentes da onda é absorvido muito mais acentuadamente que o outro.
- Um filtro polaroide transmite 80% ou mais da intensidade da luz polarizada em uma direção paralela a certo eixo do material, chamado de eixo de polarização, mas transmite menos de 1% quando a luz é polarizada perpendicularmente a esse eixo.
- Em um tipo comum de filtro polaroide, longas cadeias de moléculas dentro do filtro orientam-se em uma direção perpendicular ao eixo de polarização;

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

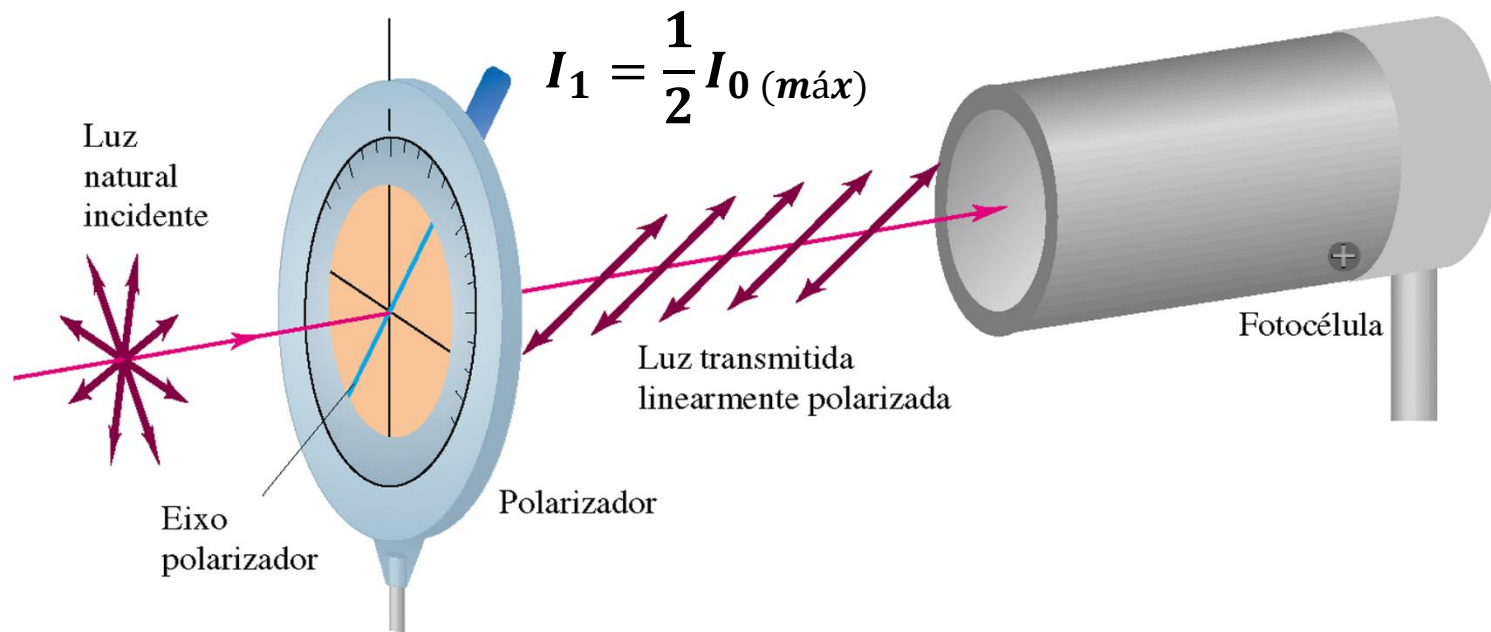
- Elas absorvem preferencialmente a luz polarizada com direção paralela ao comprimento dessas moléculas, desempenhando um papel análogo ao da grade de fios condutores que funcionam como filtro de micro-ondas.
- **Polarizador ideal:** transmite 100% da luz na direção de polarização e bloqueia totalmente a luz na direção perpendicular.
- **Polarizador real:** aproximadamente 80% de transmissão e 99% de bloqueio.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

4. Intensidade da luz após atravessar um polarizador



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



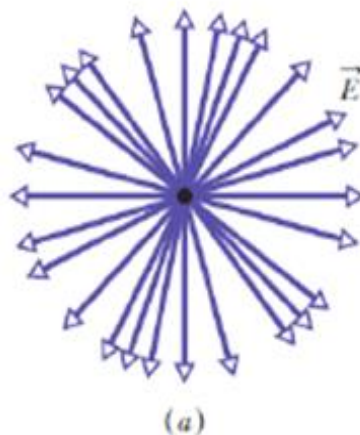
Podemos decompor o campo em um componente paralelo e outro perpendicular ao eixo do polarizador. Como a luz incidente apresenta estados de polarização aleatórios, podemos dizer que, na média, os dois componentes são iguais. Como o polarizador ideal transmite apenas o componente paralelo a seu eixo, concluímos que somente metade da intensidade incidente é transmitida.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



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

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



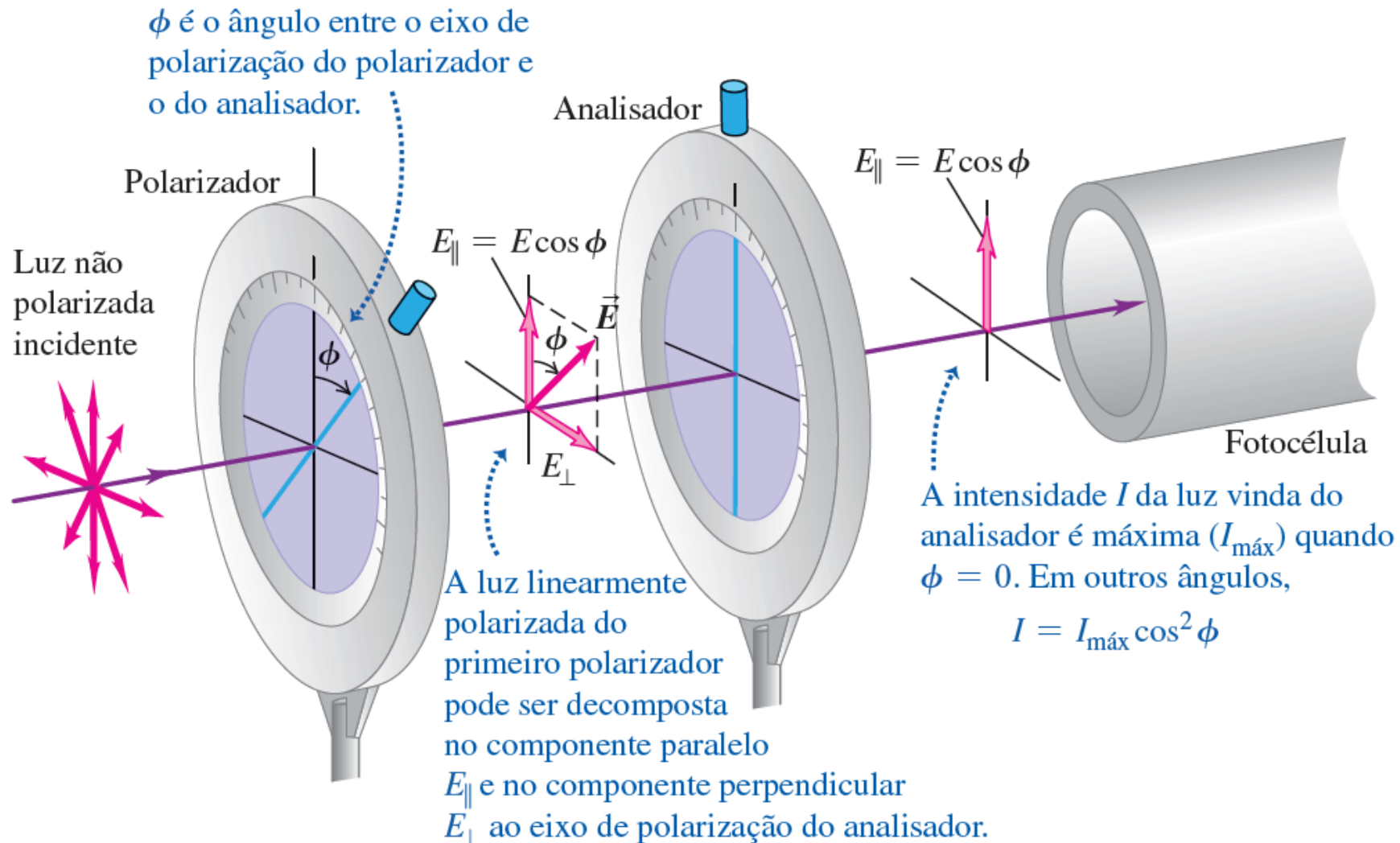
Esta é uma forma compacta de representar a luz não polarizada.

Se uma luz não polarizada de intensidade I_0 incide em um polarizador, a intensidade da luz transmitida é

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

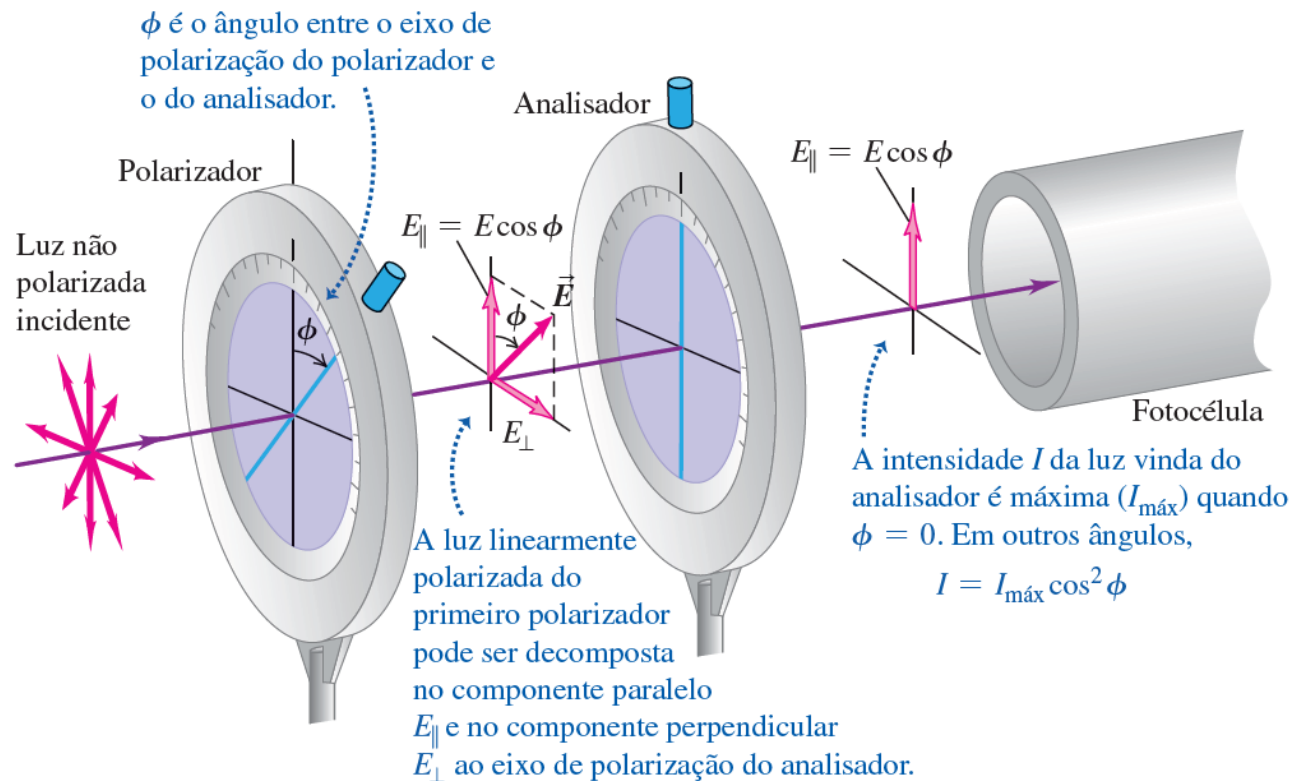
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

O que acontece quando a luz linearmente polarizada que emerge de um polarizador incide sobre um segundo polarizador, ou analisador?



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

5. Lei de Malus



Lei de Malus:

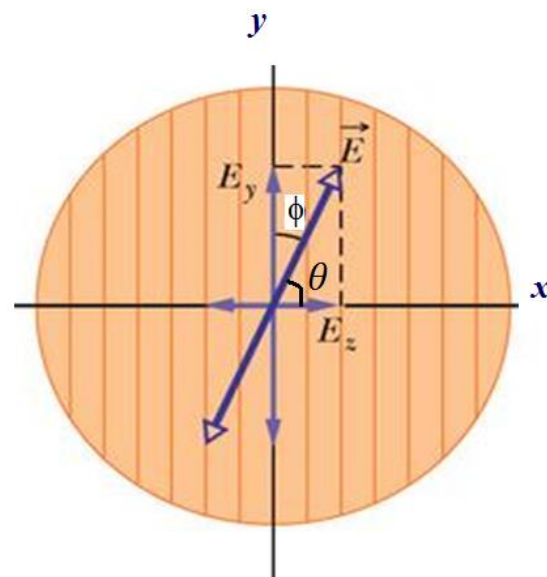
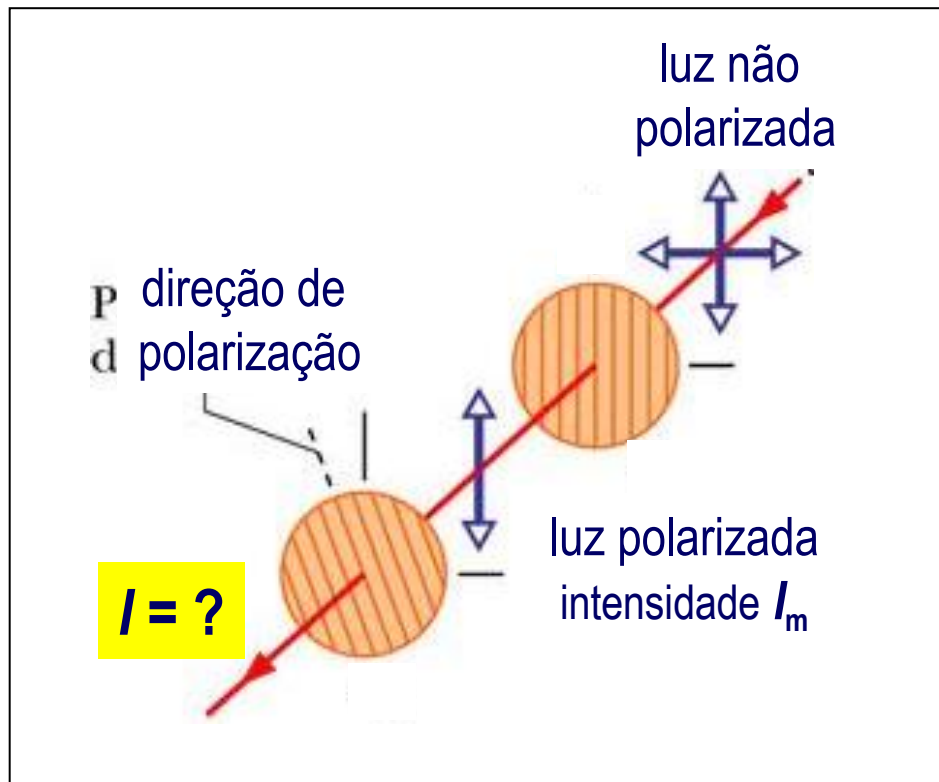
Intensidade de luz polarizada transmitida por um analisador

$$I = I_{\text{máx}} \cos^2 \phi$$

Intensidade transmitida máxima

Ângulo entre o eixo de polarização da luz e o eixo de polarização do analisador

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

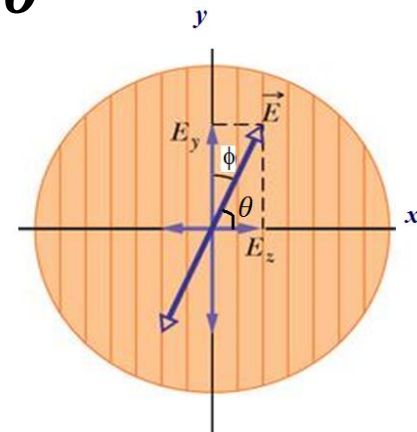


IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Vamos considerar uma onda eletromagnética com direção de polarização fazendo um ângulo θ com relação ao eixo x. Essa onda pode ser decomposta em duas componentes ao longo dos eixos x e y, com amplitudes $E_{ox} = E_0 \cos \theta$ e $E_{oy} = E_0 \sin \theta$, respectivamente. Se a onda incidir em um polarizador cujo o eixo de transmissão está ao longo do eixo x, a componente em x não sofre perdas, enquanto a componente em y é totalmente absorvida. Como, a intensidade da onda é proporcional ao quadrado do campo elétrico, a intensidade transmitida é:

$$I(\theta) = E_{ox}^2(\theta) = E_0^2 \cos^2 \theta = I_0 \cos^2 \theta$$

$$I_0 = I_{\text{máx}} \rightarrow I(\theta) = I_{\text{máx}} \cos^2 \theta$$



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

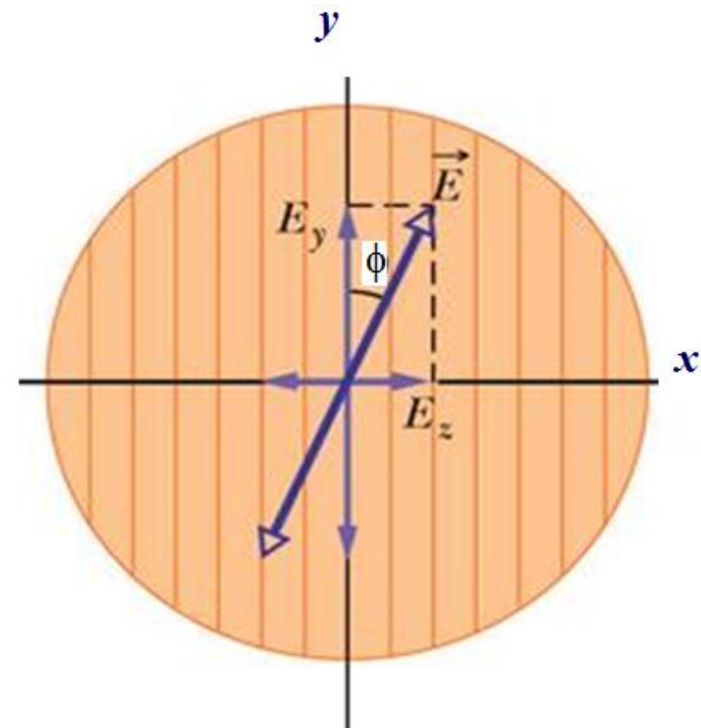
Vamos considerar uma onda eletromagnética com direção de polarização fazendo um ângulo ϕ com relação ao eixo y .

Como o eixo de transmissão está ao longo do eixo y , a componente em y não sofre perdas, enquanto a componente em x é totalmente absorvida.

$$E_y = E_{máx} \cos \phi$$

$$I \propto E_y^2 = E_{máx}^2 \cos^2 \phi$$

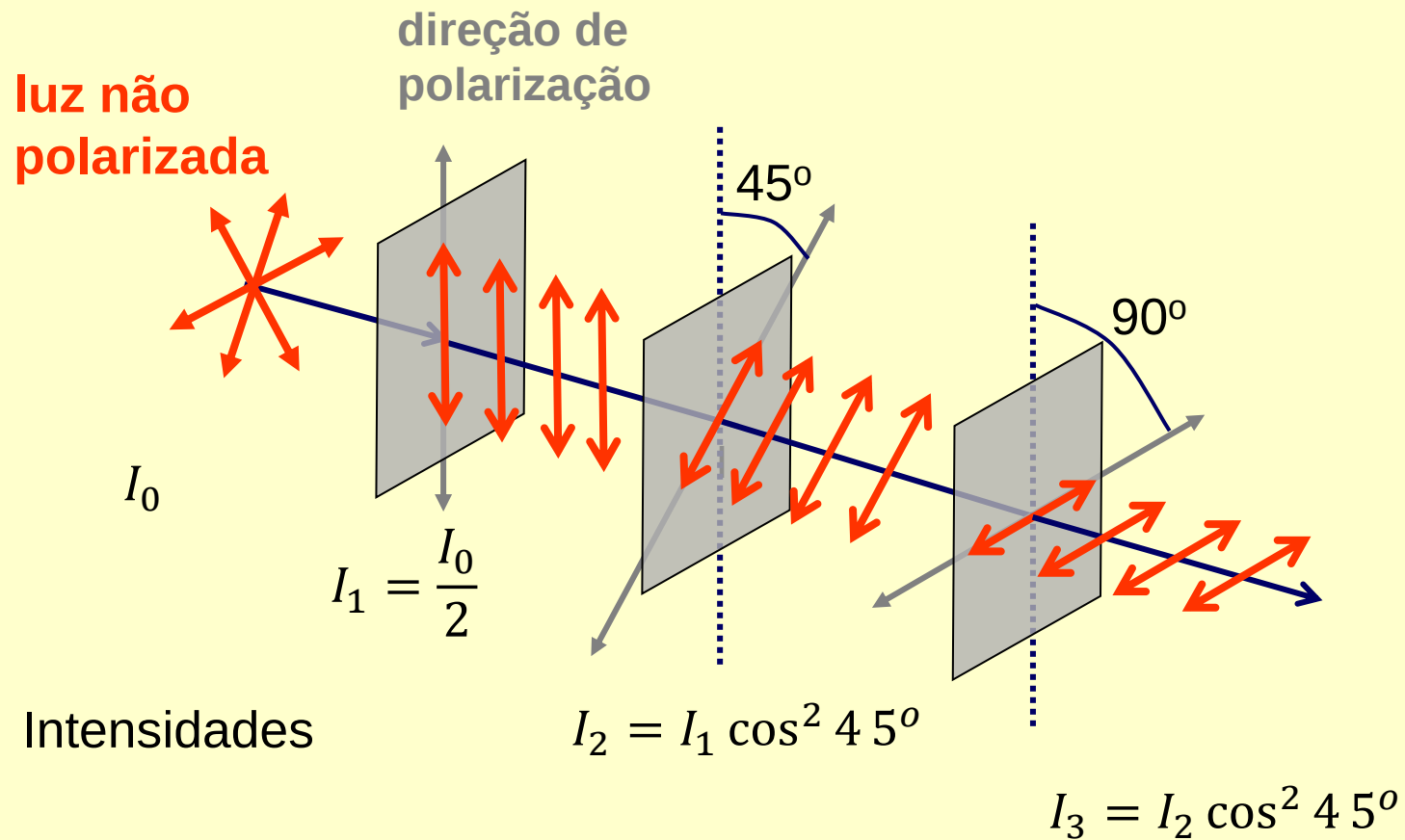
$$I = I_{máx} \cos^2 \phi$$



$I_0 = I_{máx} \rightarrow$ intensidade da luz incidente no polarizador

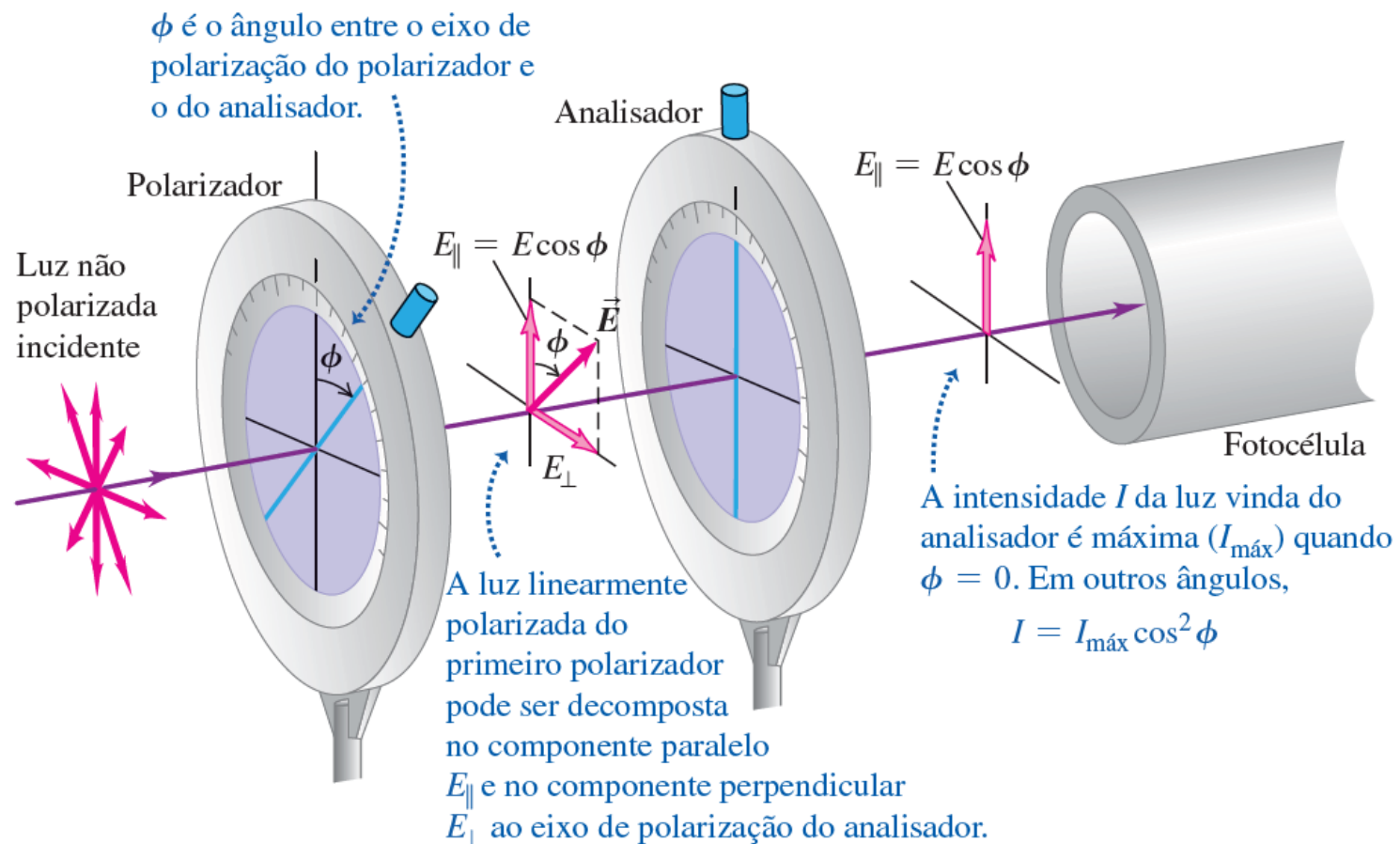
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

6. Lei de Malus – 3 Polarizadores



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Exemplo 6: Na Figura, a luz não polarizada incidente possui intensidade I_0 . Determine as intensidades dos feixes transmitidos pelos dois polarizadores, sabendo que o ângulo entre seus eixos é 30° .



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

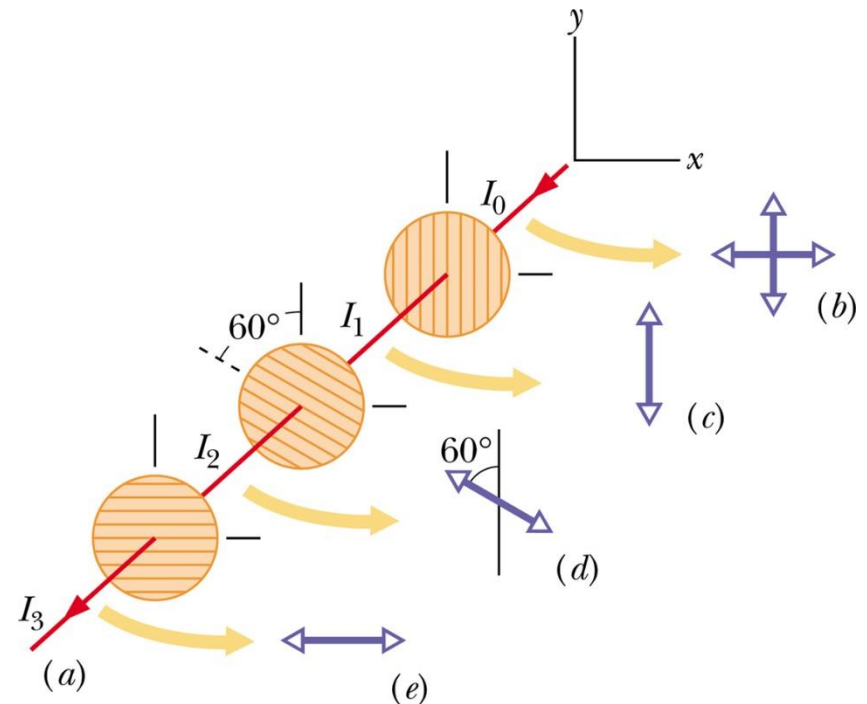
São dados a intensidade I_0 da luz incidente e o ângulo $\theta = 30^\circ$ entre os eixos dos polarizadores. Usamos a lei de Malus para encontrar as intensidades da luz que emerge de cada polarizador.

$$I_1 = \frac{I_0}{2} \rightarrow \text{Como, } I = I_m \cos^2 \phi$$

$$I_2 = I_1 \cos^2 30^\circ = \frac{I_0}{2} \cos^2 30^\circ = \frac{I_0}{2} \cdot \frac{3}{4} = \frac{I_0}{8}$$

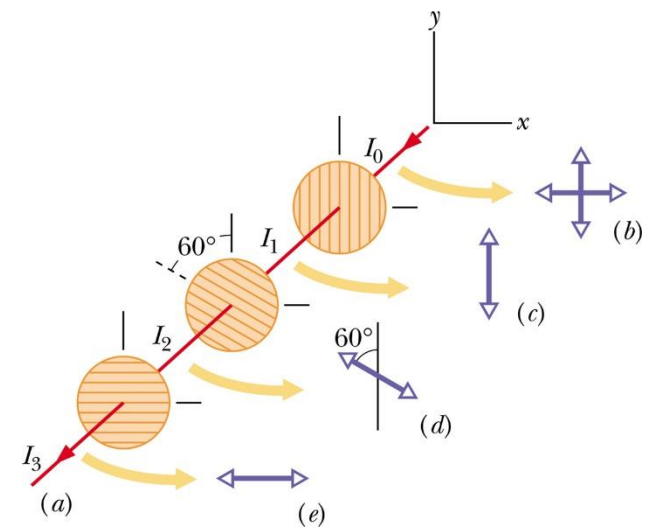
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Exemplo 7: A Figura, em perspectiva, mostra um conjunto de três filtros polarizadores; nesse conjunto incide um feixe de luz inicialmente não polarizada. A direção de polarização do primeiro filtro é paralela ao eixo y , a do segundo filtro faz um ângulo de 60° com a primeira direção no sentido anti-horário, e a do terceiro filtro é paralela ao eixo x . Que fração da intensidade inicial I_0 da luz sai do conjunto e em que direção essa luz está polarizada?

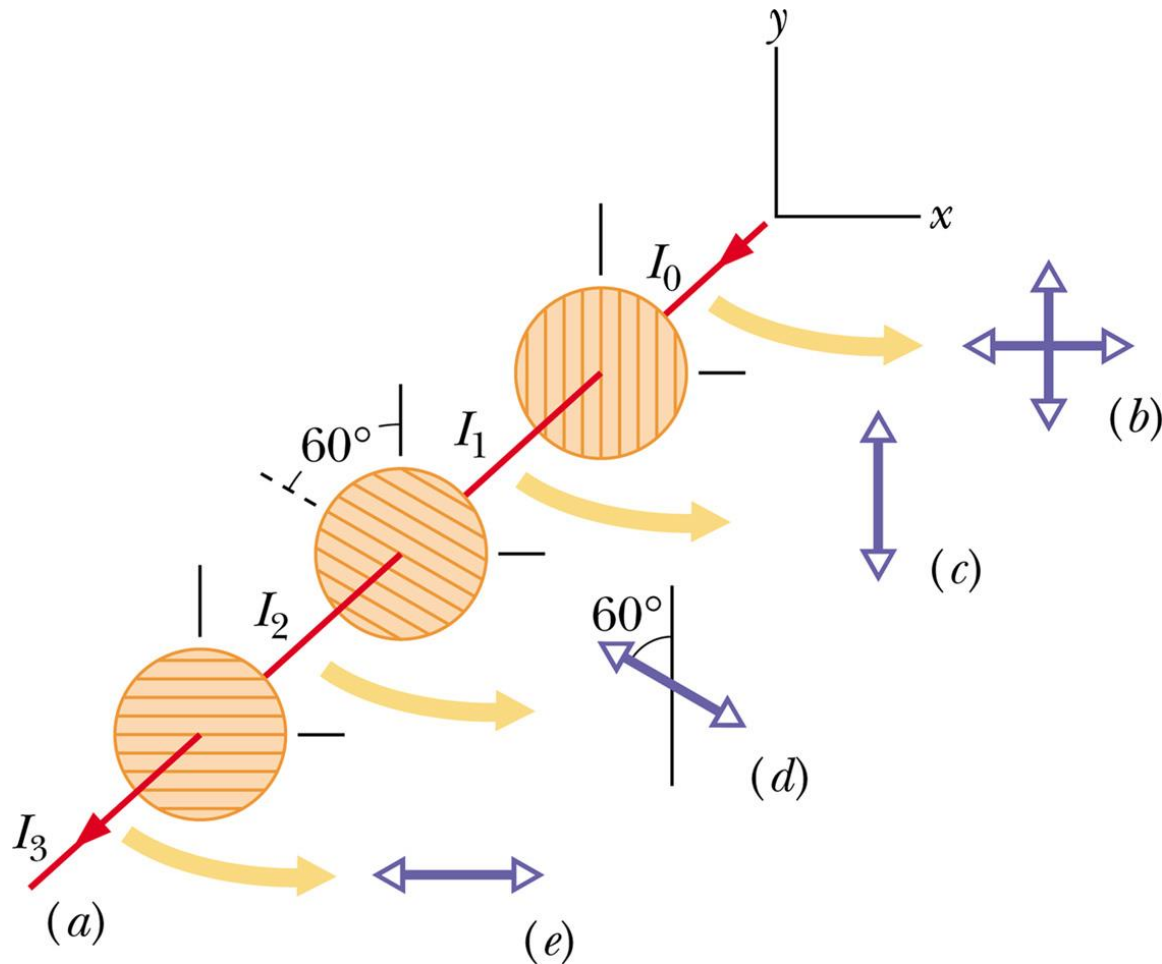


IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

- i) O cálculo deve ser realizado filtro por filtro, começando pelo filtro no qual a luz incide inicialmente.
- ii) Para determinar a intensidade da luz transmitida por um dos filtros, basta aplicar a regra da metade (se a luz incidente no filtro não estiver polarizada) ou a regra do cosseno ao quadrado (se a luz incidente no filtro já estiver polarizada).
- iii) A direção de polarização da luz transmitida por um filtro polarizador é sempre igual à direção de polarização do filtro.



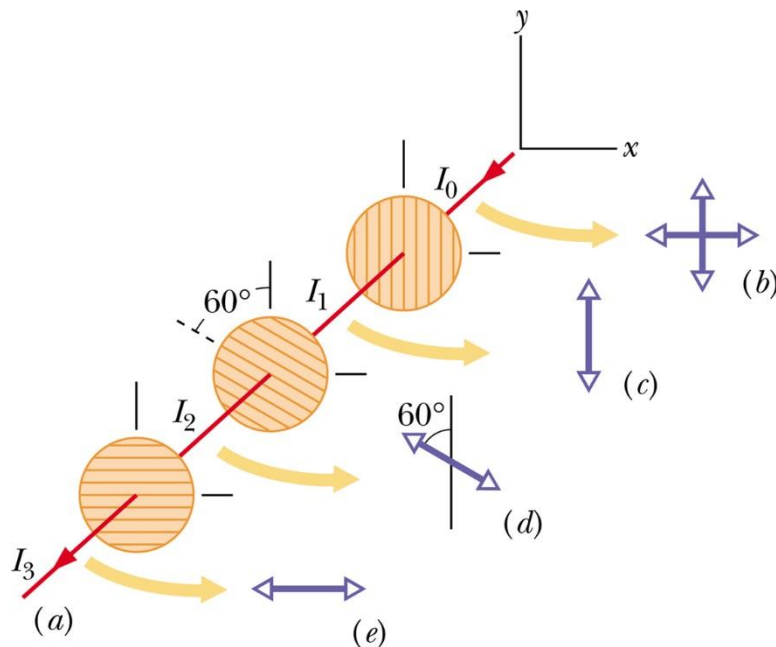
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



Primeiro filtro- a luz transmitida será: $I_1 = \frac{I_0}{2}$

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Segundo filtro- Como a luz que chega ao segundo filtro é polarizada, a intensidade I_2 da luz transmitida pelo filtro é dada pela regra do cosseno ao quadrado. O ângulo θ é o ângulo entre a direção de polarização da luz incidente (paralela ao eixo y) e a direção de polarização do segundo filtro (que faz um ângulo de 60° com o eixo y no sentido anti-horário). Assim, $\theta = 60^\circ$.

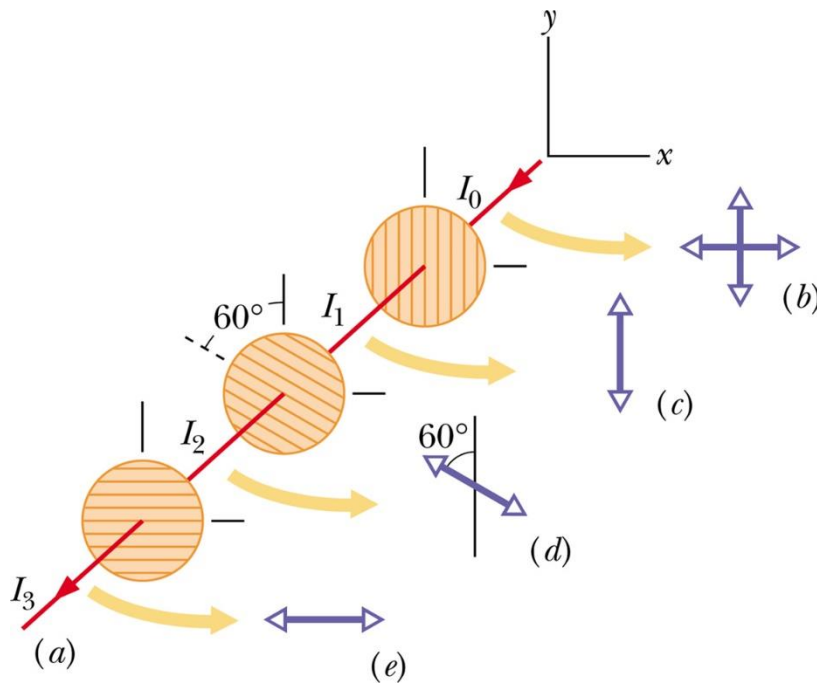


$$I_2 = I_1 \cos^2 60^\circ$$

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

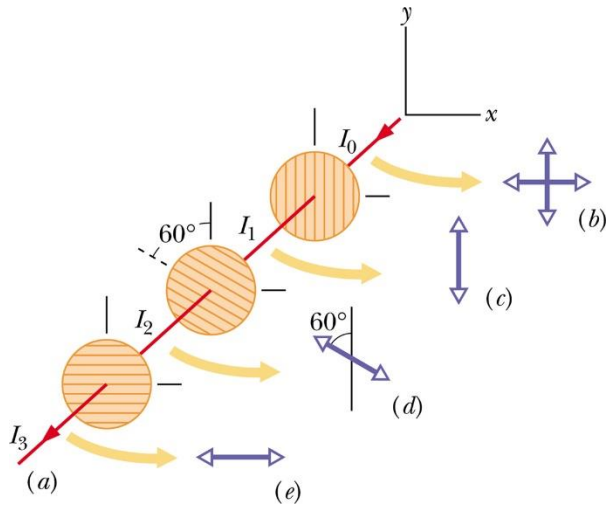
Terceiro filtro- Como a luz que chega ao terceiro filtro é polarizada, a intensidade I_3 da luz transmitida pelo filtro é dada pela regra do cosseno ao quadrado. O ângulo θ agora é o ângulo entre a direção de polarização da luz incidente no terceiro filtro e a direção de polarização do terceiro filtro (paralela ao eixo x). Desse modo, $\theta = 30^\circ$ e, portanto

$$I_3 = I_2 \cos^2 30^\circ$$



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

A luz que sai do terceiro filtro está polarizada paralelamente ao eixo x .
Para determinar a intensidade dessa luz, substituímos I_2 por seu valor em função de I_1 e I_1 por seu valor em função de I_0 :



$$I_1 = \frac{I_0}{2}$$

$$I_2 = I_1 \cos^2 60^\circ$$

$$I_3 = I_2 \cos^2 30^\circ$$

$$I_3 = I_2 \cos^2 30^\circ = (I_1 \cos^2 60^\circ) \cos^2 30^\circ$$

$$I_3 = \left(\frac{I_0}{2}\right) \cos^2 60^\circ \cos^2 30^\circ = 0,094 I_0$$

$$\frac{I_3}{I_0} = 0,094$$

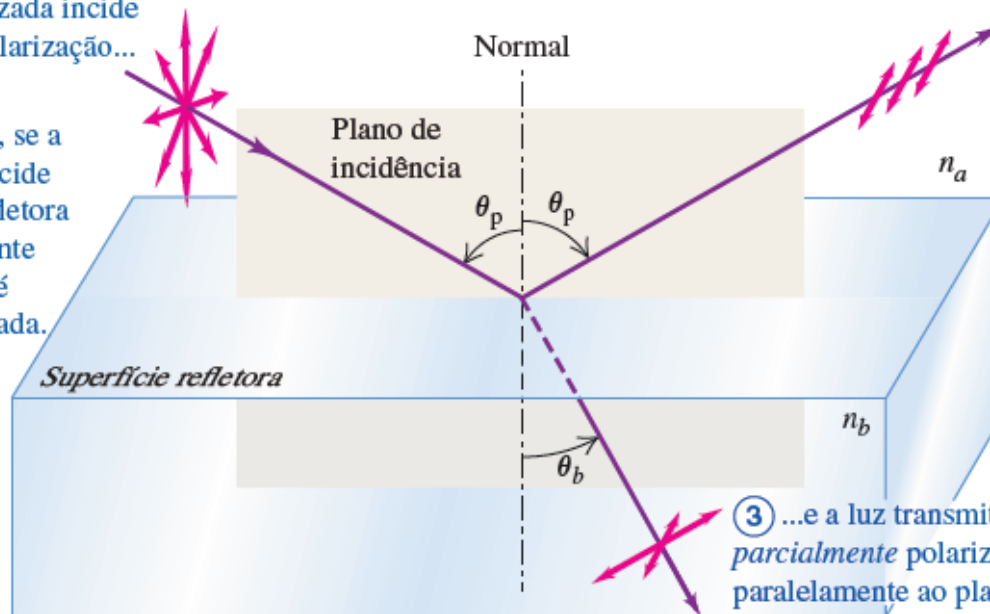
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

7. Polarização por reflexão

A luz não polarizada pode ser parcial ou totalmente polarizada por meio da reflexão.

① Se luz não polarizada incide sobre o ângulo de polarização...

④ Alternativamente, se a luz não polarizada incide sobre a superfície refletora em um ângulo diferente de θ_p , a luz refletida é *parcialmente* polarizada.

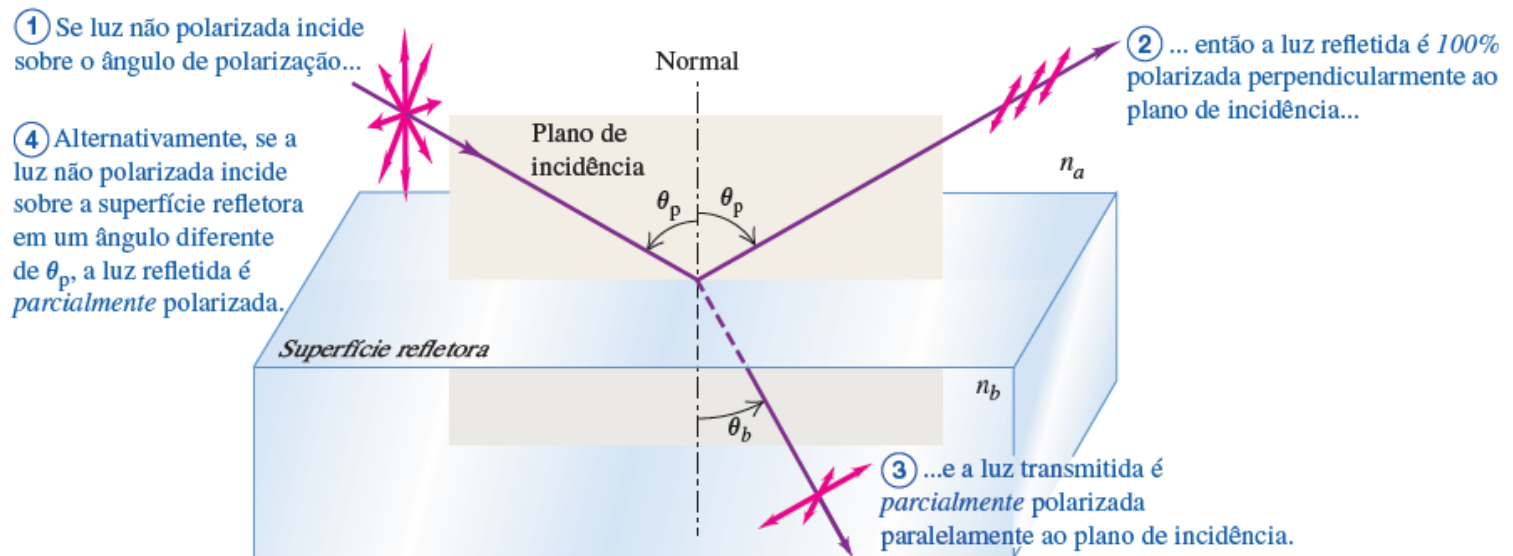


② ... então a luz refletida é 100% polarizada perpendicularmente ao plano de incidência...

③ ...e a luz transmitida é *parcialmente* polarizada paralelamente ao plano de incidência.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Na Figura, um feixe de luz natural não polarizada incide sobre uma superfície refletiva entre dois materiais óticos transparentes. Na maior parte dos ângulos de incidência, as ondas em que o campo elétrico **E** é perpendicular ao plano de incidência (ou seja, paralelo ao plano da interface refletora) são refletidas mais acentuadamente que as ondas com **E** paralelo ao plano de incidência. Nesse caso, as ondas são parcialmente polarizadas na direção perpendicular ao plano de incidência.



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Em 1812, o cientista inglês sir David Brewster descobriu que, quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de polarização θ_p , o raio refletido é perpendicular ao raio refratado. Nesse caso, o ângulo de refração θ_b torna-se igual a $90^\circ - \theta_p$. De acordo com a lei da refração,

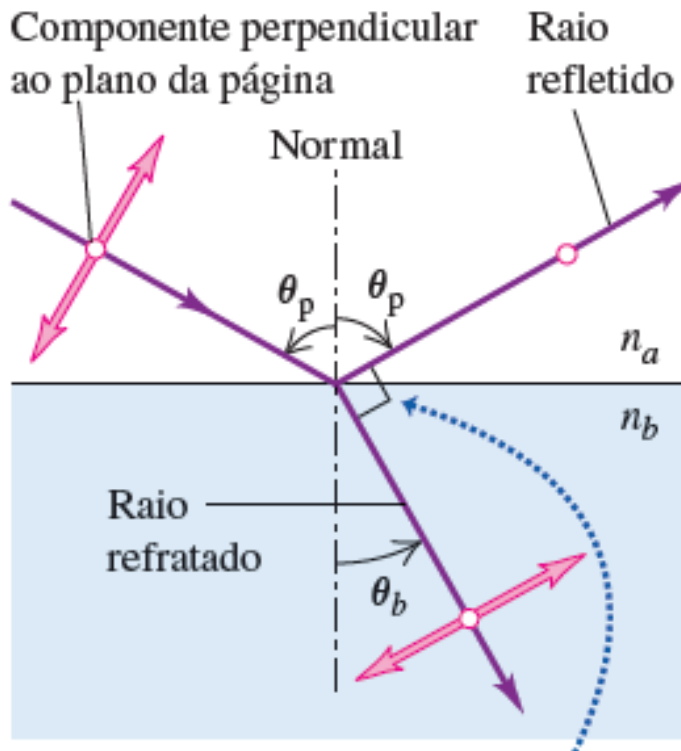
$$n_a \sen \theta_p = n_b \sen \theta_b = n_b \sen(90^\circ - \theta_p) = n_b \cos \theta_p$$

$$n_a \sen \theta_p = n_b \cos \theta_p$$

$$\tan \theta_p = \frac{\sen \theta_p}{\cos \theta_p} = \frac{n_b}{n_a}$$

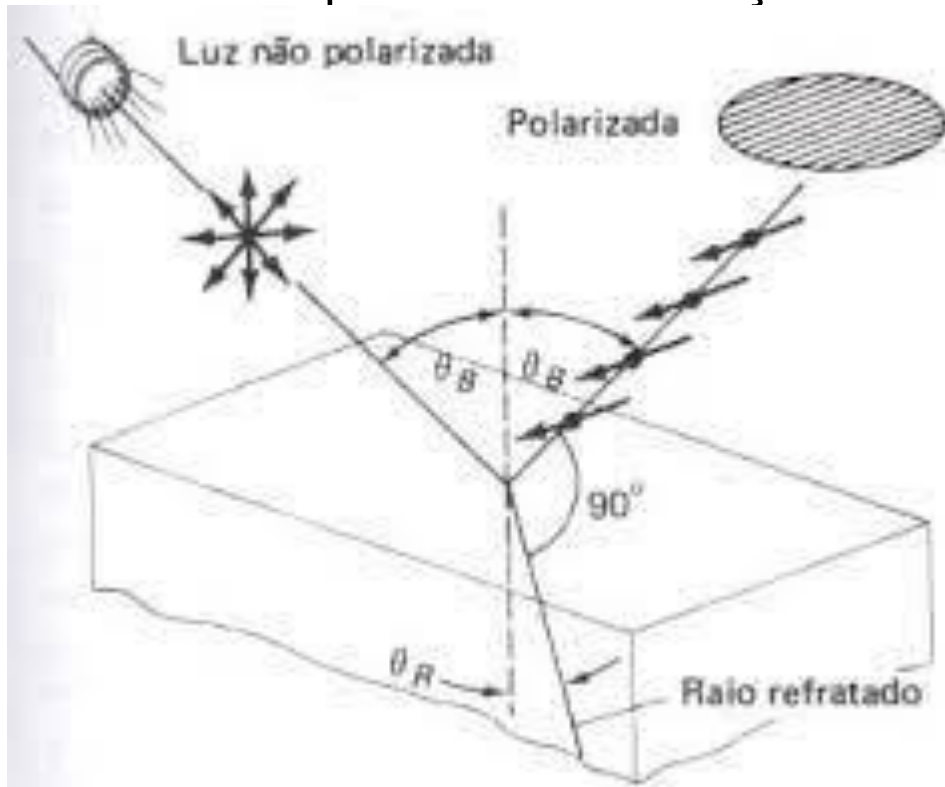
Lei de Brewster para o ângulo de polarização:

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a}$$



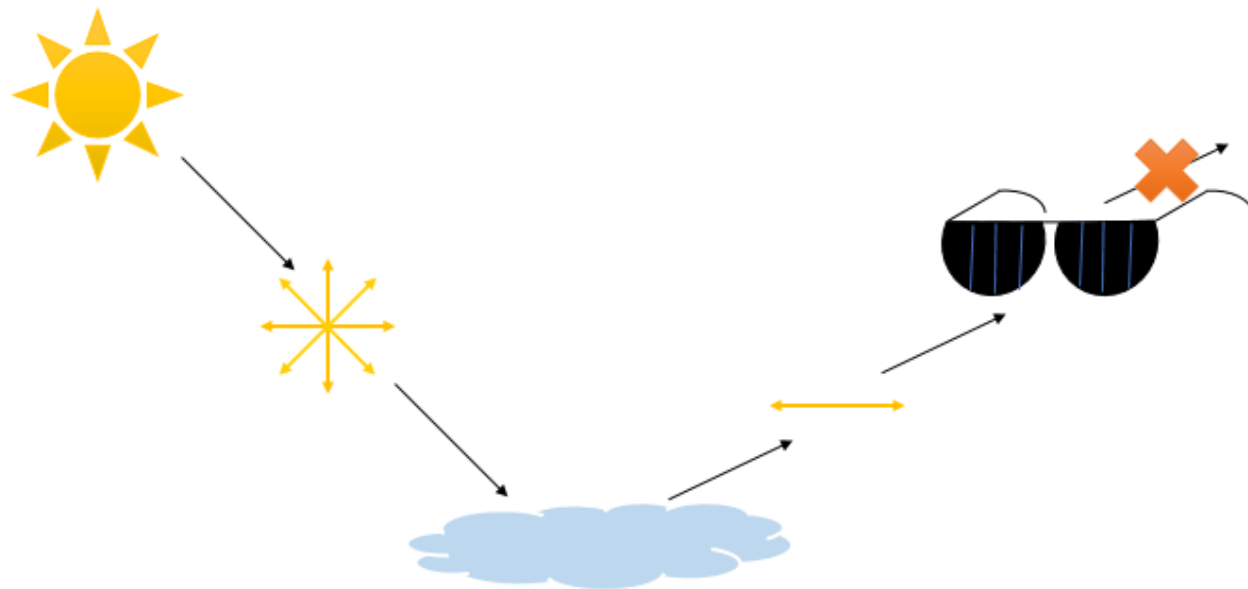
IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

- A **polarização por reflexão** é o motivo pelo qual os filtros polarizadores são amplamente usados em óculos de sol.
- Quando a luz solar é refletida por uma superfície horizontal, o plano de incidência é vertical e a luz refletida contém preponderantemente luz polarizada na direção horizontal.



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

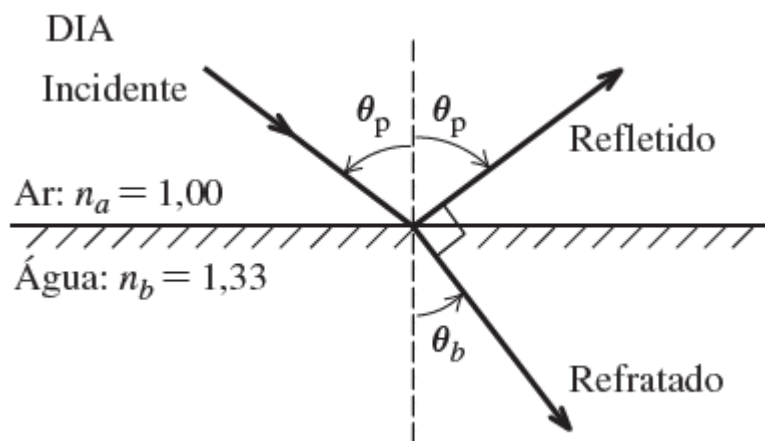
- O fabricante de óculos produz lentes com eixo de polarização na direção vertical, de modo que a maior parte da luz refletida com polarização horizontal não atinge seus olhos.
- Além disso, os óculos também reduzem em cerca de 50% a intensidade global da luz não polarizada que incide sobre as lentes.



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Exemplo 8: A luz solar se reflete na superfície calma de uma piscina sem banhistas. (a) Qual é o ângulo de reflexão para que a luz refletida seja completamente polarizada? (b) Qual é o ângulo de refração correspondente? (c) Durante a noite, uma lâmpada no fundo da piscina permanece acesa. Refaça os itens (a) e (b) para a luz que incide na superfície da piscina a partir dessa lâmpada.

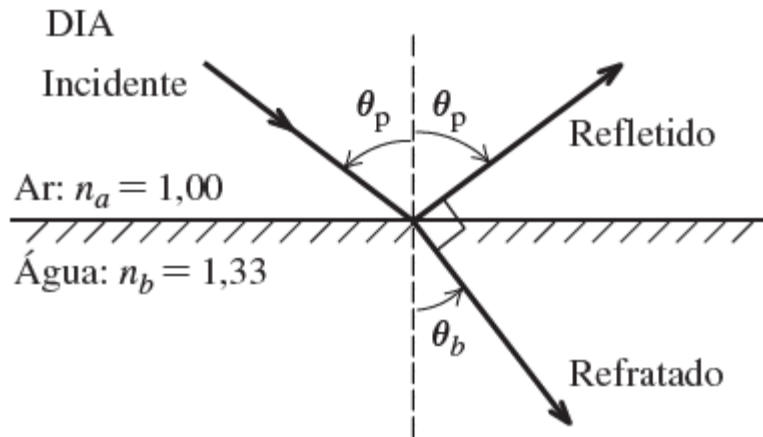
(a) a parte superior da Figura mostra a situação durante o dia. Como a luz passa do ar para a água, temos $n_a = 1,00$ (ar) e $n_b = 1,33$ (água).



$$\tan \theta_p = \frac{n_{\text{água}}}{n_{\text{ar}}} = \frac{1,33}{1,00} = 1,33$$

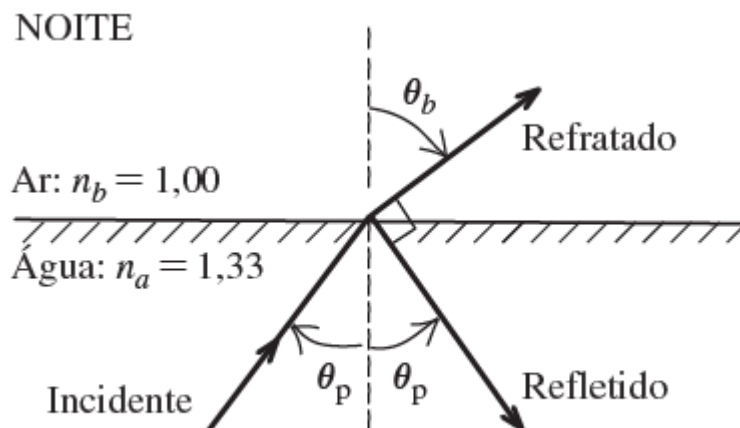
$$\theta_p = 53,1^\circ$$

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



$$\theta_b = 90^\circ - \theta_p = 90^\circ - 53,1^\circ = 36,9^\circ$$

(c) À noite, a luz se move na água em direção ao ar; portanto, agora $n_a = 1,33$ e $n_b = 1,00$.



$$\tan \theta_p = \frac{n_{ar}}{n_{\acute{a}gua}} = \frac{1,00}{1,33} = 0,75$$

$$\theta_p = 36,9^\circ$$

$$\theta_b = 90^\circ - \theta_p = 90^\circ - 36,9^\circ = 53,1^\circ$$

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Exemplo 9: Você está tirando uma fotografia de um edifício comercial no nascer do sol, de modo que o ângulo de incidência é praticamente horizontal. A fim de minimizar os reflexos das janelas do edifício, você coloca um filtro polarizador sobre a lente da câmara. Como você deve orientar esse filme:

- (i) Com o eixo de polarização na vertical;
- (ii) Com o eixo de polarização na horizontal;
- (iii) Qualquer das duas direções;
- (iv) Nenhuma das orientações surtirá efeito.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Resposta: (ii).

A luz do sol refletida nas janelas do alto edifício é parcialmente polarizada na direção vertical, visto que todas as janelas estão dispostas em um plano vertical. O filtro polaroide na frente das lentes é orientado com seus eixos de polarização perpendiculares à direção dominante de polarização da luz refletida.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

8. Espalhamento da luz

- O céu é azul. O pôr do sol é vermelho.
- **Espalhamento:** ao olhar para o céu durante o dia, a luz que você vê é a luz solar que foi absorvida e depois retransmitida em muitas direções.
- Se a Terra não possuísse atmosfera, o céu seria tão negro durante o dia quanto à noite, tal como é visto por um astronauta no espaço ou na lua.



IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

- Ao olhar para o céu durante o dia, a luz que você vê é a luz solar que foi **absorvida** e depois **retransmitida** em muitas direções. É um tipo de interação da luz com a matéria.
- Esse fenômeno denomina-se **espalhamento**.
- O espalhamento da luz por partículas muito menores que o seu comprimento de onda é chamado de espalhamento Rayleigh por ter sido descrito pela primeira vez por Lord Rayleigh, um físico britânico.
- No espalhamento Rayleigh, a intensidade da luz espalhada é proporcional a $\frac{1}{\lambda^4}$, ou seja, quanto menor o comprimento de onda mais intenso é o espalhamento.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

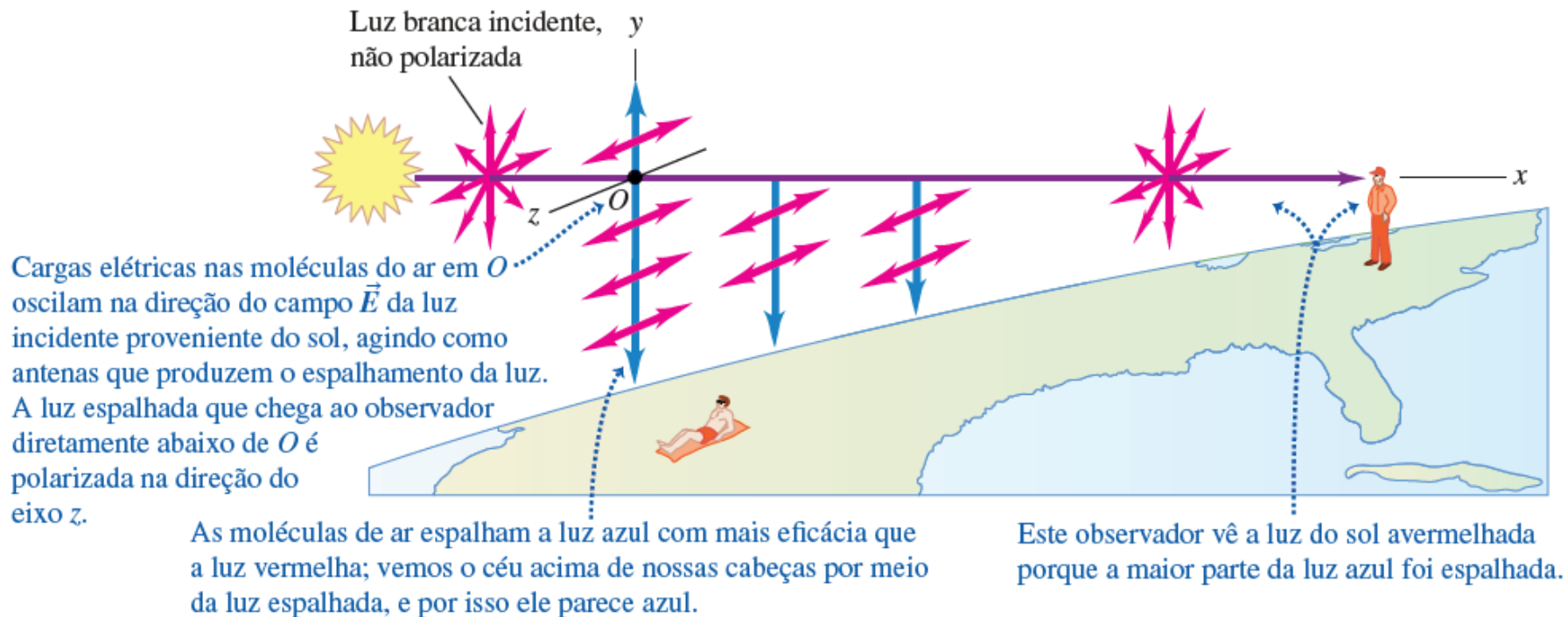


- Para o banhista que está observado o céu diretamente acima de sua cabeça, a luz que ele vê é a do Sol que foi espalhada pelas moléculas da atmosfera e chega ao seu olho.
- Essa luz contém predominantemente a parte azul do espectro, que tem menor comprimento de onda.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ

- À medida que a luz do Sol percorre toda a extensão da atmosfera em direção ao observador situado à leste, as componentes de menor comprimento de onda são espalhadas e chega a esse observador predominantemente a luz vermelha, que tem maior comprimento de onda.
- Por isso, o primeiro observador vê o céu azul e o segundo, que observa o sol no horizonte, vê o pôr-do-sol avermelhado. A luz emitida pelo Sol é não polarizada.
- No entanto, a luz espalhada pelas moléculas da atmosfera em uma direção perpendicular à direção de propagação da luz incidente nelas é polarizada.
- Na figura, a luz que chega ao banhista é a do Sol que foi espalhada na direção perpendicular. Essa luz é polarizada.
- Por outro lado, a luz do pôr-do-sol, vista pelo outro observador, é a que foi espalhada na mesma direção de propagação da luz incidente. Essa luz não é polarizada.

IV – POLARIZAÇÃO DA LUZ



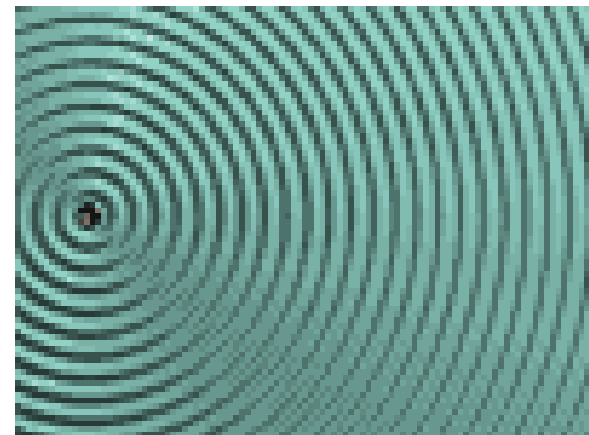
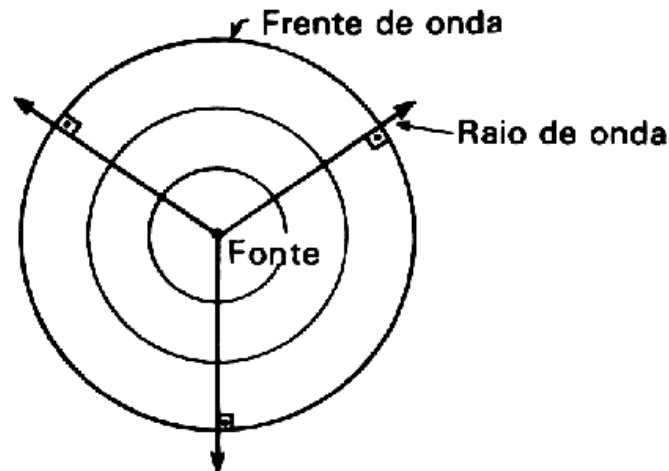
Quando o banhista deitado que se encontra à esquerda olha para cima, ele vê a luz solar azul, polarizada, espalhada pelas moléculas do ar. O observador à direita vê luz avermelhada, não polarizada, quando olha para o sol.

V – DEMONSTRAÇÃO DA LEI DE SNELL

9. Princípio de Huygens

Frente de Onda: é a fronteira entre a região atingida pela onda e a região ainda não atingida.

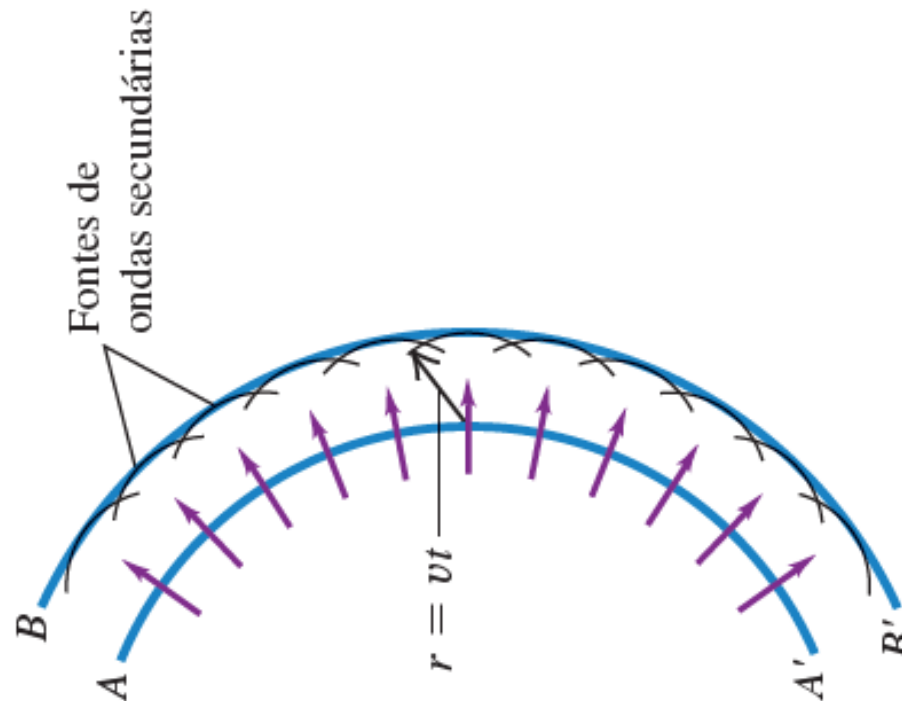
Raio de Onda: é uma linha orientada que tem origem na fonte de onda e é perpendicular às frentes de onda. Os raios de onda indicam a direção e o sentido de propagação das ondas num meio.



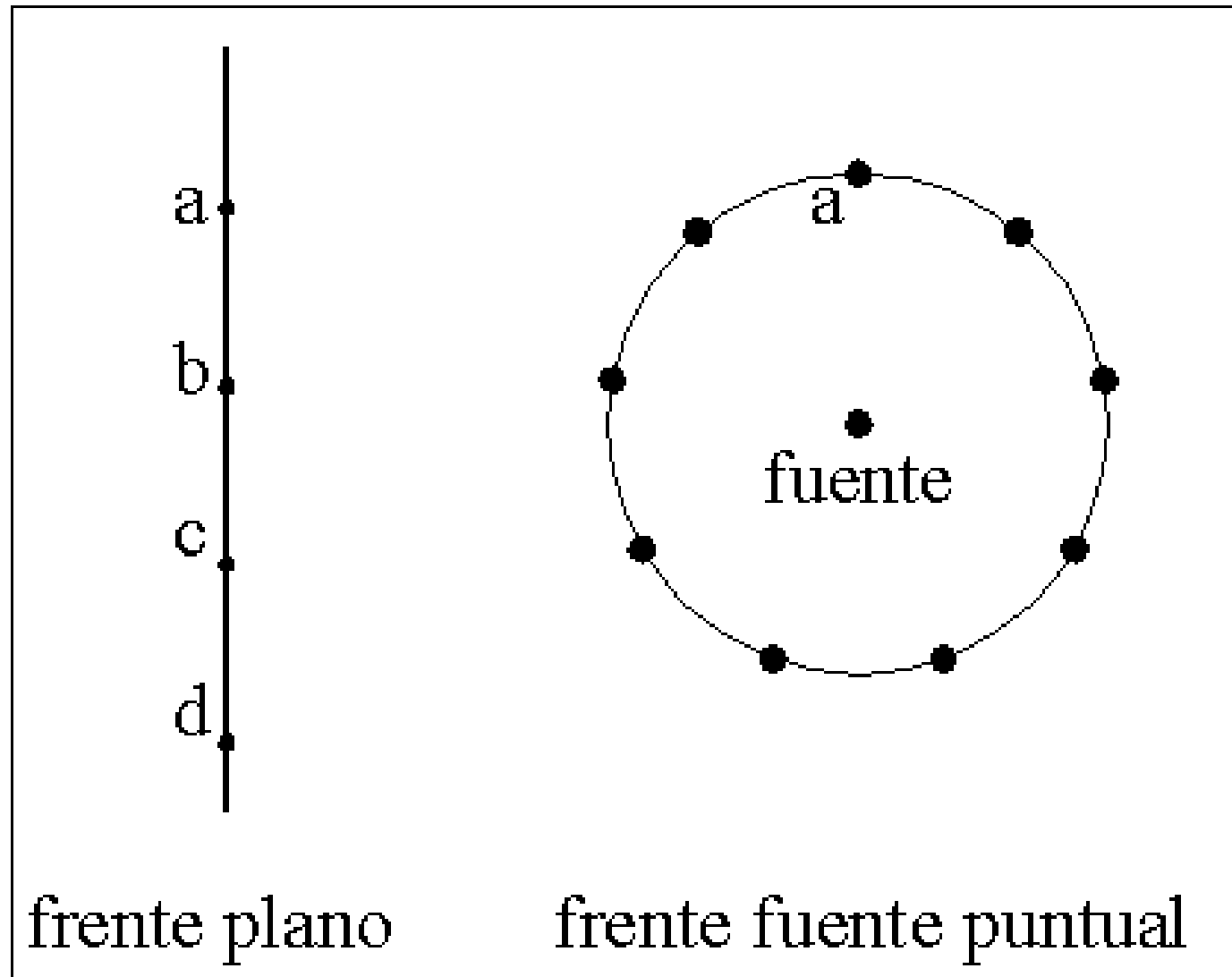
V – DEMONSTRAÇÃO DA LEI DE SNELL

Princípio de Huygens

- Todos os pontos de uma frente de onda podem ser considerados fontes de ondas secundárias que se espalham em todas as direções com uma velocidade igual à velocidade de propagação da onda.

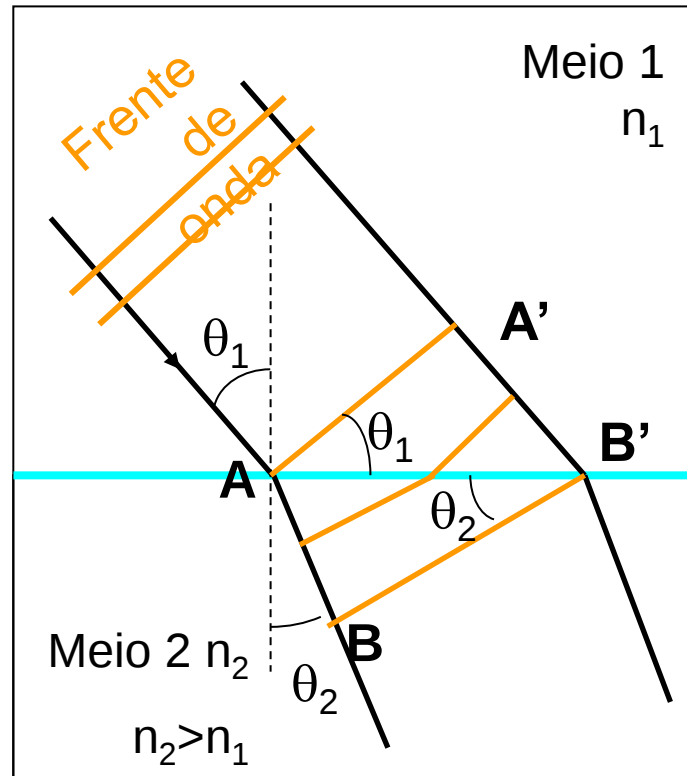


V – DEMONSTRAÇÃO DA LEI DE SNELL



V – DEMONSTRAÇÃO DA LEI DE SNELL

Num certo intervalo de tempo t , a onda se desloca de AA' até BB'

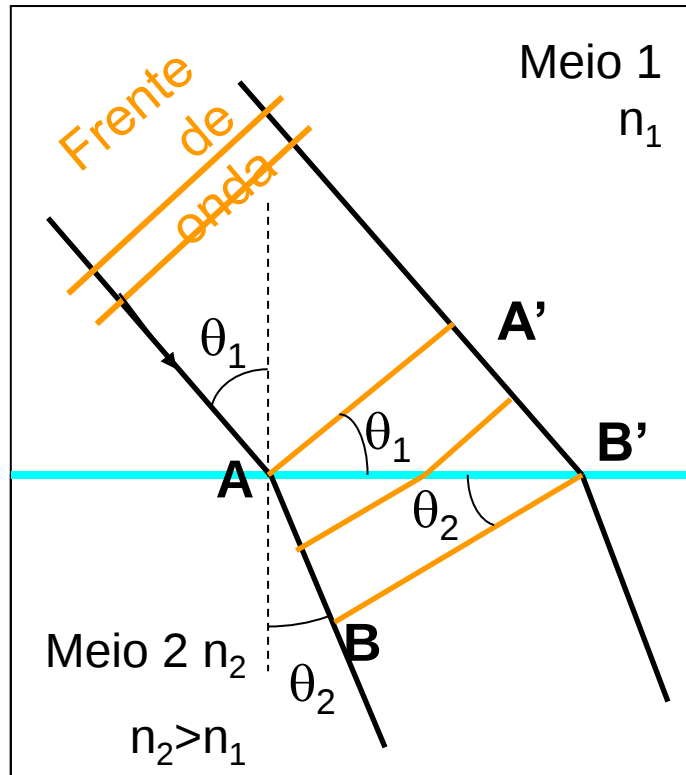


O trecho AB é percorrido no meio 2, com velocidade v_2 e o trecho $A'B'$ é percorrido no meio 1, com velocidade v_1 . Então:

$$\begin{array}{l} AB = v_2 t \\ A'B' = v_1 t \end{array} \quad \longrightarrow \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{v_1}{v_2}$$

V – DEMONSTRAÇÃO DA LEI DE SNELL

Pela figura vemos que:



$$\sin \theta_1 = \frac{A'B'}{AB'} \quad \sin \theta_2 = \frac{AB}{AB'}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\text{Como } n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ e } n_2 = \frac{c}{v_2}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Delta t_{AB} = \Delta t_{A'B'} = \frac{AB}{v_2} = \frac{A'B'}{v_1}$$

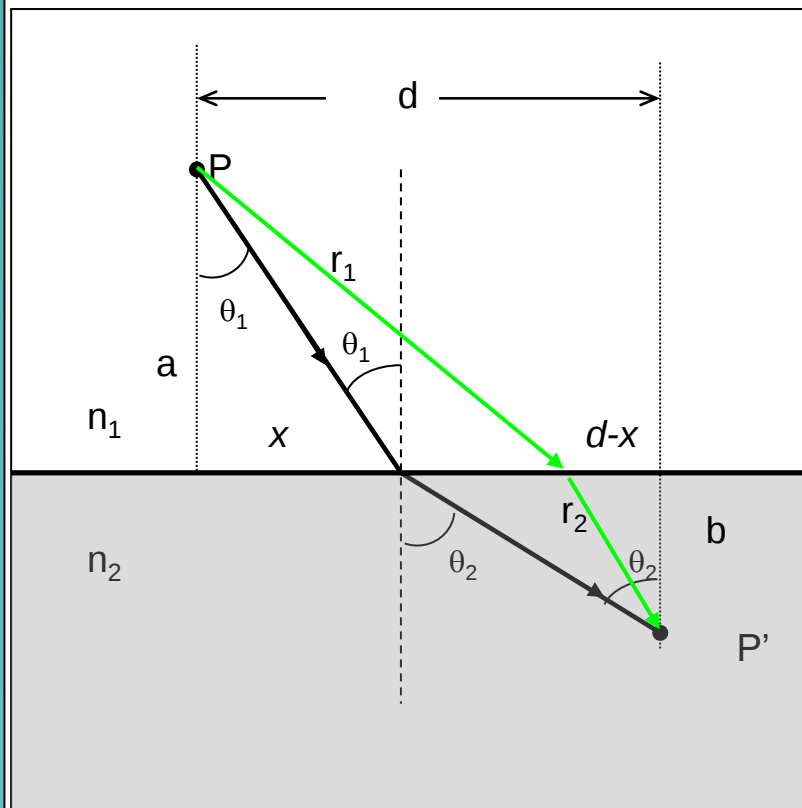
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A'B'}{AB}$$

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

V – DEMONSTRAÇÃO DA LEI DE SNELL

10. Princípio de Fermat

Quando um raio de luz propaga-se entre dois pontos P e P' quaisquer, a trajetória seguida é aquela que requer o menor tempo de percurso



$$v_1 = c/n_1, v_2 = c/n_2$$

r_1 = distância percorrida no meio 1

r_2 = distância percorrida no meio 2

Tempo total para percurso $PP' = t$

$$t = \frac{r_1}{v_1} + \frac{r_2}{v_2} = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{c/n_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{c/n_2}$$

Escolhendo diferentes valores de x , pode-se tomar diferentes trajetórias entre P e P'

V – DEMONSTRAÇÃO DA LEI DE SNELL

$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{c/n_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}}{c/n_2}$$

Para obter o tempo mínimo vamos derivar a expressão anterior, em relação a x , e igualar a derivada a zero;

$$\frac{dt}{dx} = \frac{n_1}{c} \frac{d}{dx} (a^2 + x^2)^{1/2} + \frac{n_2}{c} \frac{d}{dx} (b^2 + (d - x)^2)^{1/2} = 0$$

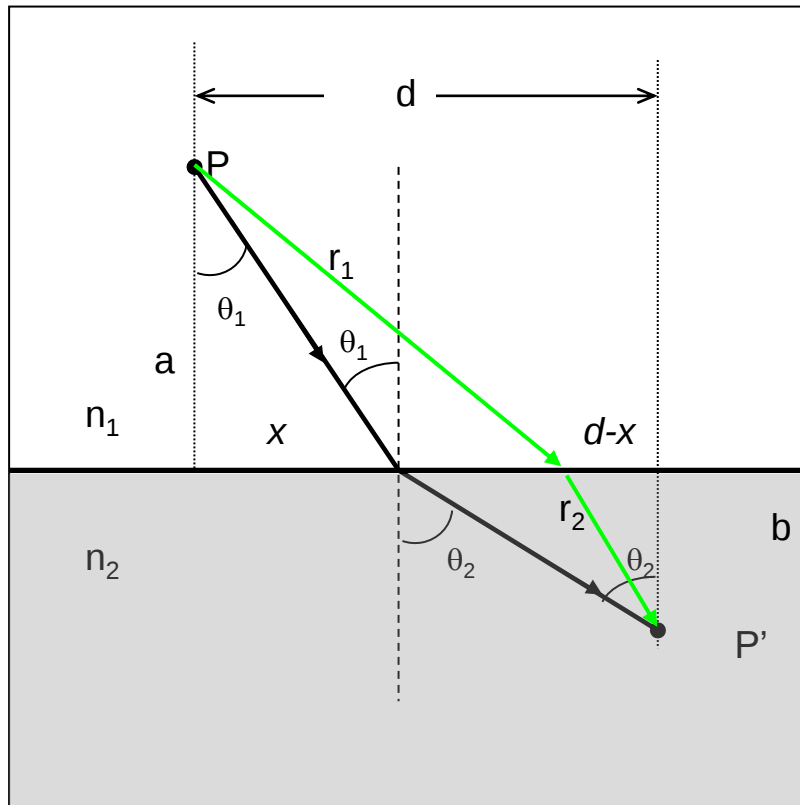
$$\frac{dt}{dx} = \frac{n_1}{c} \left(\frac{1}{2} \right) \frac{2x}{(a^2 + x^2)^{1/2}} + \frac{n_2}{c} \left(\frac{1}{2} \right) \frac{2(d - x)(-1)}{(b^2 + (d - x)^2)^{1/2}} = 0$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{n_1 x}{c(a^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{n_2(d - x)}{c(b^2 + (d - x)^2)^{1/2}} = 0$$

V – DEMONSTRAÇÃO DA LEI DE SNELL

$$\frac{dt}{dx} = \frac{n_1 x}{c(a^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{n_2(d - x)}{c(b^2 + (d - x)^2)^{1/2}} = 0$$

Pela figura:



$$\text{sen}\theta_1 = \frac{x}{r_1} = \frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}}$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{d - x}{r_2} = \frac{d - x}{(b^2 + (d - x)^2)^{1/2}}$$

$$\frac{n_1 \text{sen}\theta_1}{c} - \frac{n_2 \text{sen}\theta_2}{c} = 0$$

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

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