

Semana 04

**Natureza e
propagação da Luz**

Física III - Licenciatura

Prof. Henrique A. M. Faria

Introdução

- A óptica é uma área da física que estuda as **leis da radiação eletromagnética**, em particular as relativas à **radiação luminosa**.
- Distinguem-se dois ramos de investigação:
 - **Óptica Física.**
 - **Óptica geométrica.**

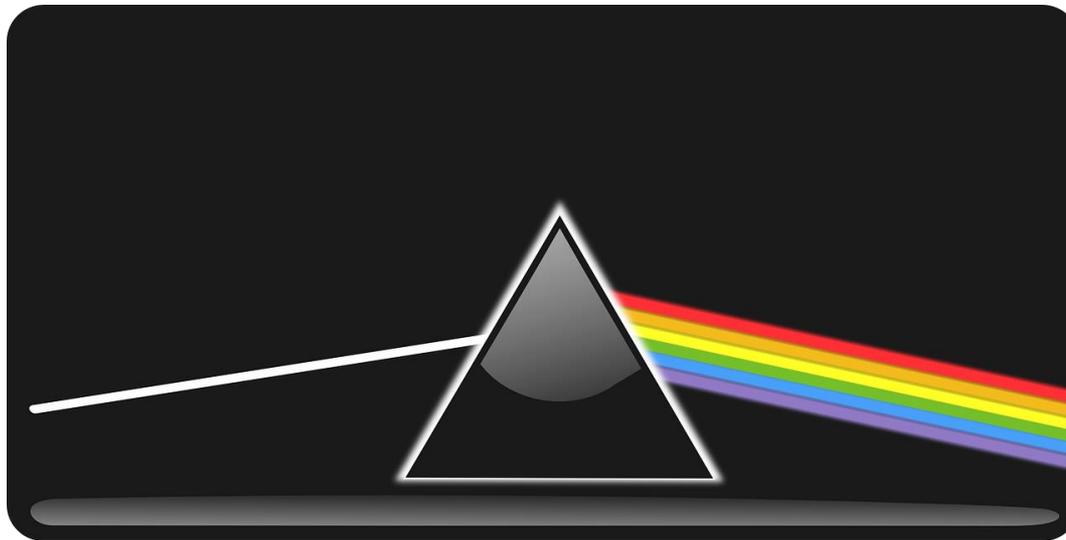
Óptica Física

- Fenômenos nos quais a **natureza ondulatória** da radiação eletromagnética **é relevante**.

- Dentre esses fenômenos estão:
 - Interferência.
 - Difração.
 - Polarização.

Óptica Geométrica

- Estudam-se as leis da **reflexão** e da **refração**, supondo que a **radiação** luminosa se propaga seguindo **trajetórias retilíneas** chamadas de **raios luminosos**.



A natureza da luz

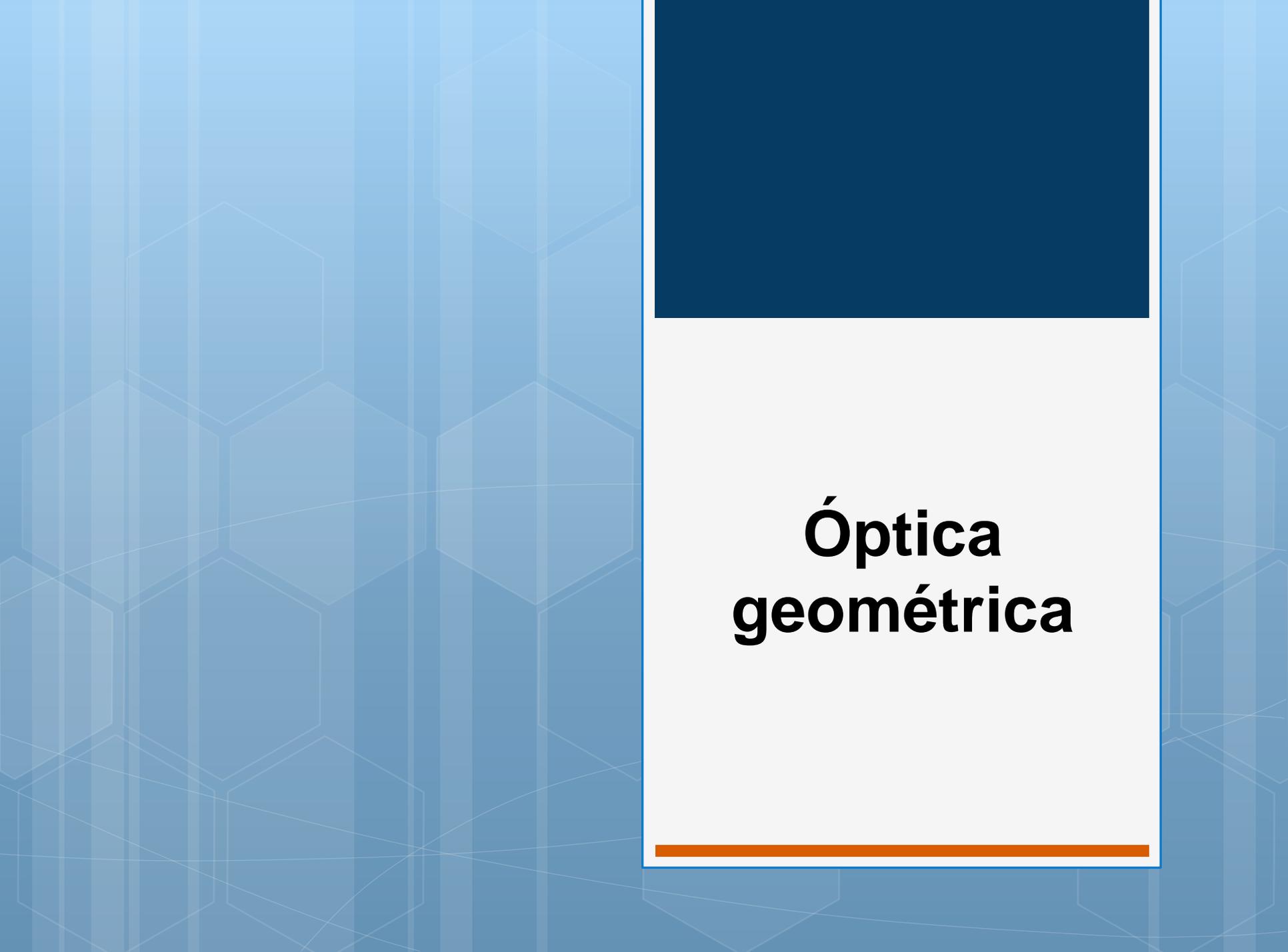
- Luz é toda radiação eletromagnética perceptível à **visão humana**.
- São **comprimentos de onda** situados na faixa do espectro eletromagnético entre **380 e 780 nanômetros**.
- **Inclui-se** na definição de luz as regiões próximas a luz visível: **ultravioleta e infravermelho**.

A natureza da luz

- **Até a época de Isaac Newton (1642-1727):**
 - Luz constituída de corpúsculos.
- **Por volta de 1665:**
 - Primeiras evidências das propriedades ondulatórias.
- **Século XIX (1800):**
 - Explicação da luz como onda se tornou convincente.
 - Clerk Maxwell (1873) previu a luz como onda eletrom.
 - Heinrich Hertz (1887) mostrou que a luz é uma onda
- **Século XX (1900):**
 - Reconhecimento da dualidade onda-partícula da luz.

A natureza da luz (Dualidade)

- Os efeitos associados à emissão e absorção da luz revelam a natureza corpuscular.
- A energia transportada ocorre em pacotes distintos conhecidos como *fótons* ou *quanta*.
- A propagação da luz pode ser mais bem descrita usando-se um modelo ondulatório.
- Os aspectos ondulatórios e corpusculares da luz foram conciliados em 1930, com o desenvolvimento da Eletrodinâmica Quântica.

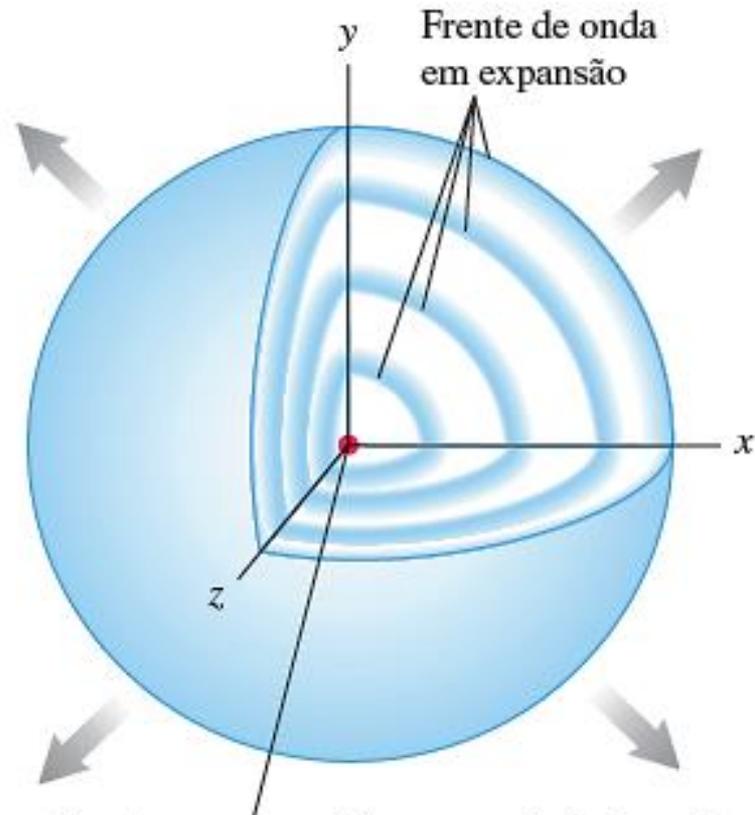


Óptica geométrica

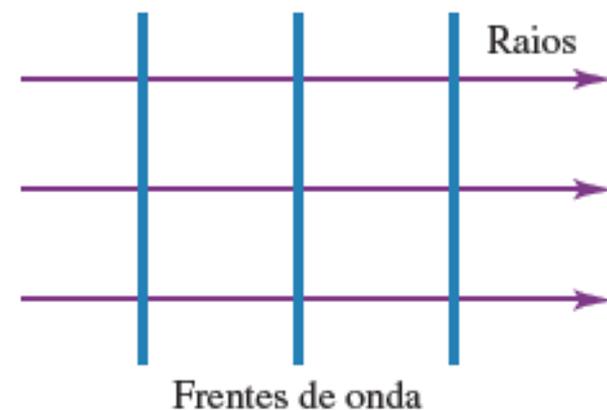
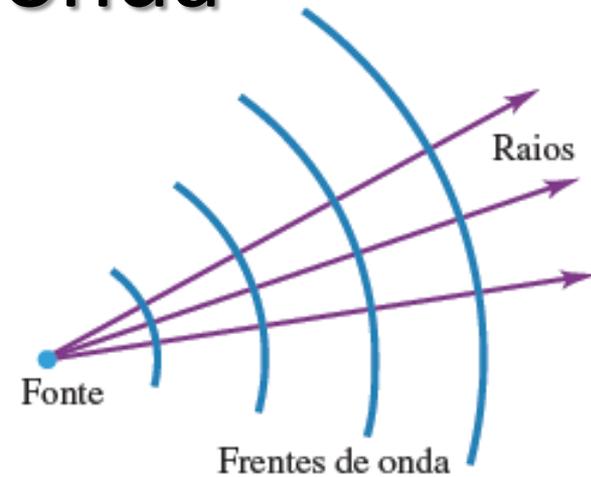
Onda, raio e frente de onda

- O conceito de frente de onda é utilizado para descrever a propagação de uma onda.
- Em qualquer instante, todos os pontos sobre uma frente de onda estão na mesma parte do ciclo de sua perturbação.
- Qualquer superfície concêntrica com a fonte é uma frente de onda.
- Para descrever as direções da propagação é mais conveniente representar a luz por meio de um raio (perpendiculares à frente de onda).

Onda, raio e frente de onda



Fonte sonora puntiforme produzindo ondas sonoras esféricas (alternando compressões e expansões de ar)



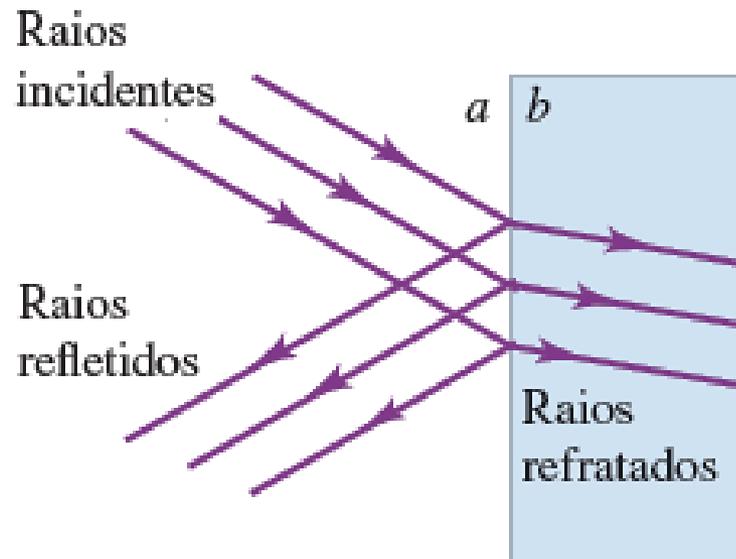
Reflexão e refração

- Quando uma onda de luz atinge uma superfície lisa e transparente pode haver reflexão e/ou refração (transmissão).
- Para simplificar a interpretação desenha-se um único raio para cada feixe de luz.
- Podem haver dois tipos de reflexão:
 - **Especular** - existe um único ângulo de reflexão
 - **Difusa** - os raios são espalhados em diversas direções em uma superfície rugosa.

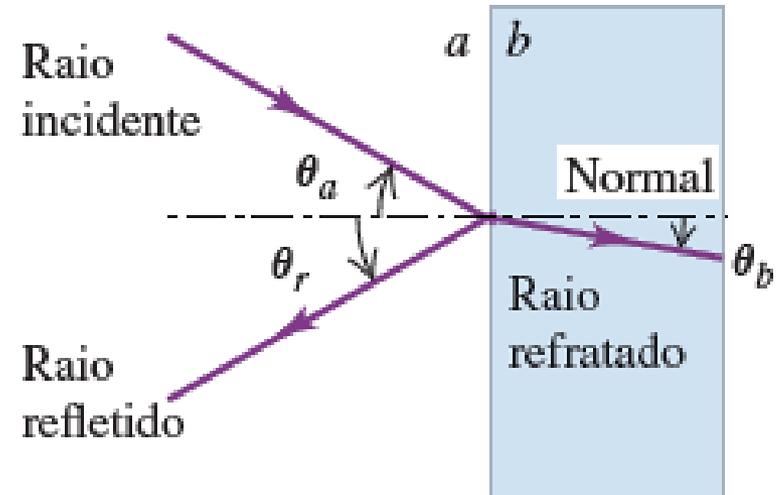
Reflexão e refração



Reflexão e refração



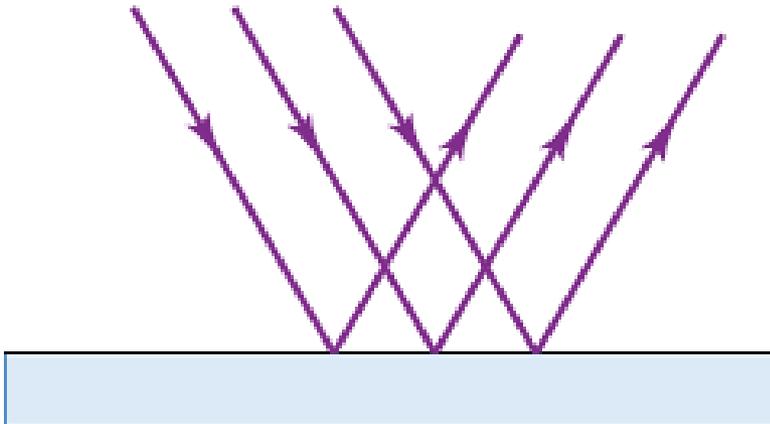
(b) As ondas no ar e no vidro externos representadas por raios



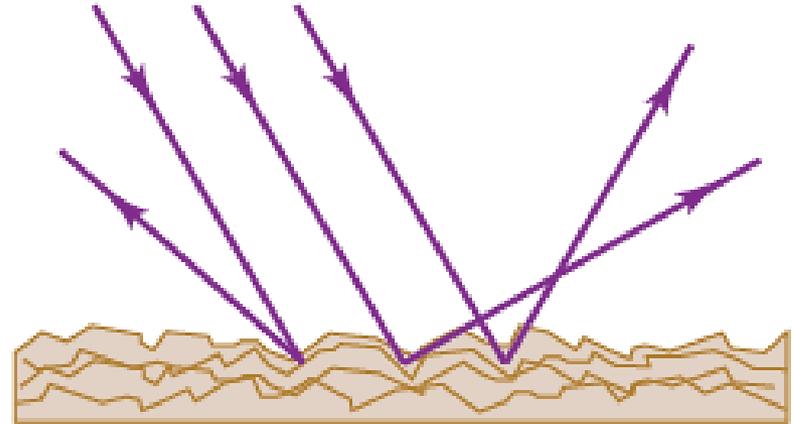
(c) A representação simplificada

Reflexão e refração

(a) Reflexão especular



(b) Reflexão difusa



Reflexão e refração

- O **índice de refração (n)** desempenha um papel fundamental na ótica geométrica. Definido por:

$$\text{Índice de refração de um material ótico} \quad n = \frac{c}{v}$$

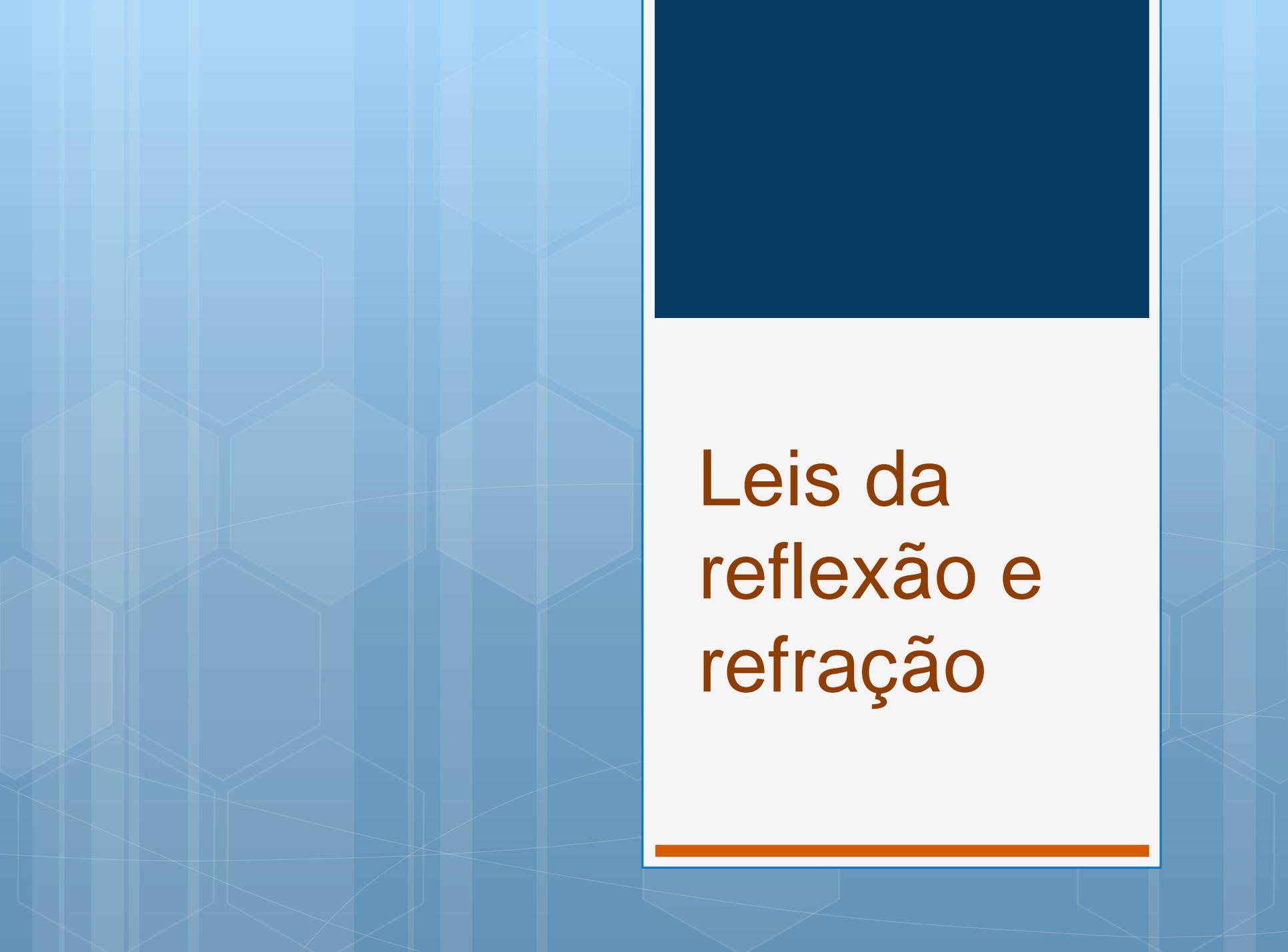
Velocidade da luz no vácuo
Velocidade da luz no material

- A luz sempre se propaga mais lentamente através de um material do que no vácuo.
- Portanto, o valor de n em qualquer **meio material** é **sempre maior que 1**. No vácuo, $n = 1$.
- Quanto **maior** n de um material, **menor** será a **velocidade** da onda nesse material.

Valores do índice de refração de alguns meios.

Meio	n
Ar (CNTP)	1,000
Água (a 20°C)	1,333
Gelo	1,309
Cloreto de sódio	1,544
Diamante	2,417
Vidro Flint médio	1,620

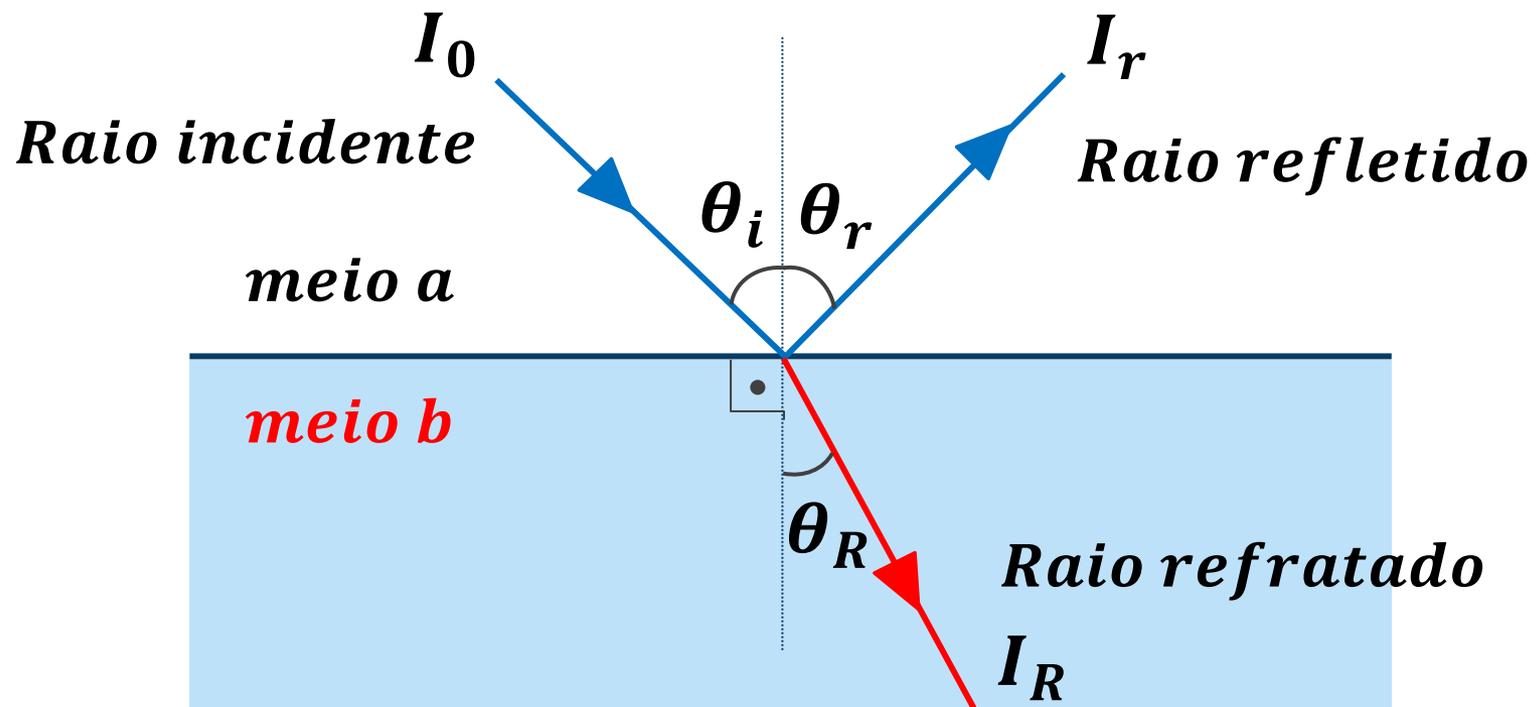
- n depende também do comprimento de onda.
- n de um gás aumenta com a elevação da densidade.



Leis da reflexão e refração

Leis de reflexão e refração da luz

- Quando um raio de luz, que se propaga em um meio, encontra a **superfície de um outro** meio pode ocorrer: **reflexão e/ou refração**.

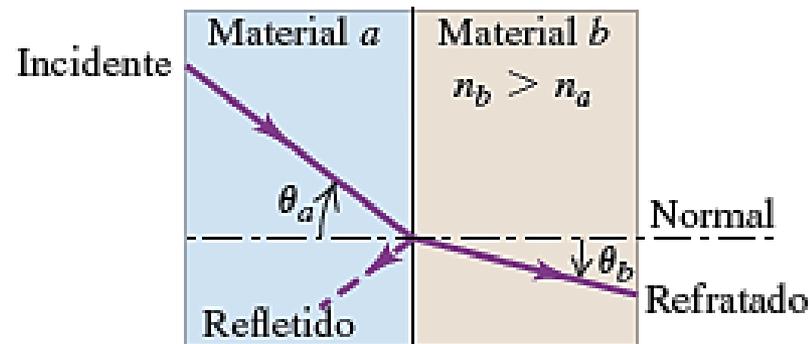


Leis de reflexão e refração da luz

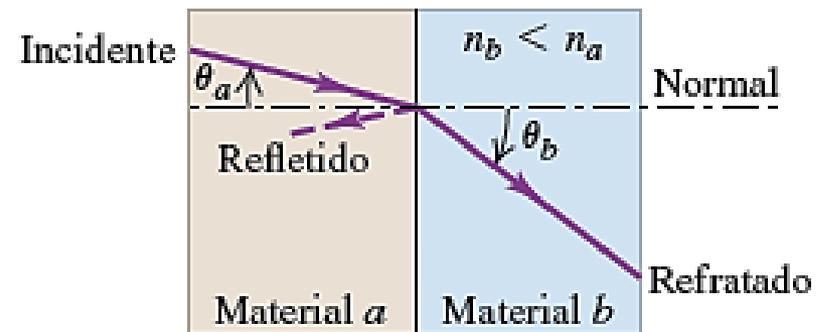
- As direções dos raios são especificadas pelo **ângulo θ** entre a **direção do raio e a normal à superfície**.
- Os raios incidente, refletido, refratado e a normal estão todos em um mesmo plano.
- O raio transmitido muda de direção e por isso recebe o nome de raio refratado.
- O ângulo do raio refratado em relação à normal depende do índice de refração n .

Leis de reflexão e refração da luz

(a) Um raio entrando em um material de índice de refração *maior* se desvia *aproximando-se* da normal.



(b) Um raio entrando em um material de índice de refração *menor* se desvia *afastando-se* da normal.

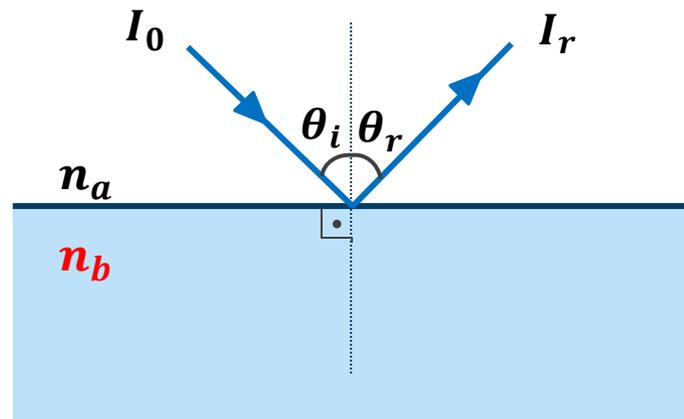


(c) Um raio com a mesma orientação da normal não sofre desvio, independentemente dos materiais.



Lei da Reflexão

- Verifica-se experimentalmente que o ângulo de incidência (θ_i) é igual ao ângulo de reflexão (θ_r).

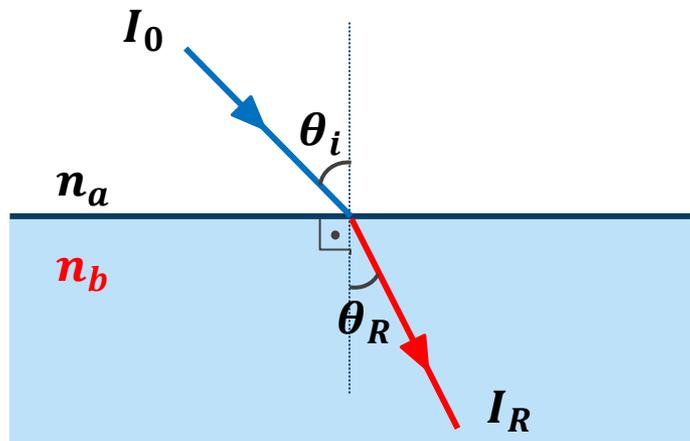


$$\theta_i = \theta_r$$

(lei da reflexão)

Lei da refração (Lei de Snell)

- O seno do ângulo de incidência (θ_i) e do ângulo de refração (θ_R) estão relacionados com os índices de refração dos meios.



$$n_a \operatorname{sen}\theta_i = n_b \operatorname{sen}\theta_R$$

(lei de Snell)

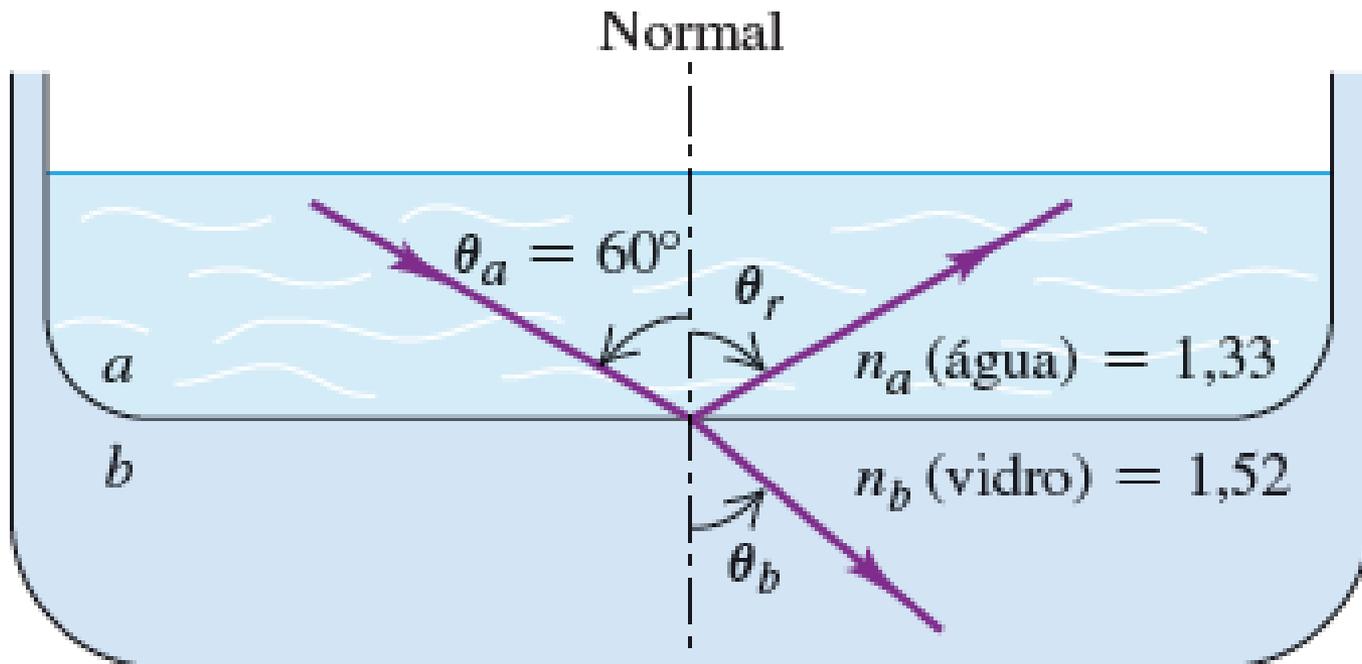
Índice de refração e aspectos ondulatórios

- A **frequência f não varia** quando a onda passa de um meio para outro.
- A velocidade v é **sempre menor** que a velocidade c **no vácuo**.
- O **comprimento de onda λ é diferente** quando a onda passa de um meio para outro.
- Isso porque, para qualquer meio, $v = \lambda f$.
- Logo, λ no meio é **sempre menor que λ_0** no vácuo.

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \quad \text{como: } n = \frac{c}{v} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Exemplo 33.1

Na Figura 33.11, o material a é a água e o material b é um vidro com índice de refração igual a 1,52. Se o raio incidente forma um ângulo de 60° com a normal, qual as direções dos raios refletido e refratado?



Exemplo 33.1 (resolução)

$$\theta_r = \theta_a = 60^\circ$$

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

$$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a = \frac{1,33}{1,52} \sin 60^\circ = 0,758$$

$$\theta_b = \arcsen(0,758) = 49,3^\circ$$

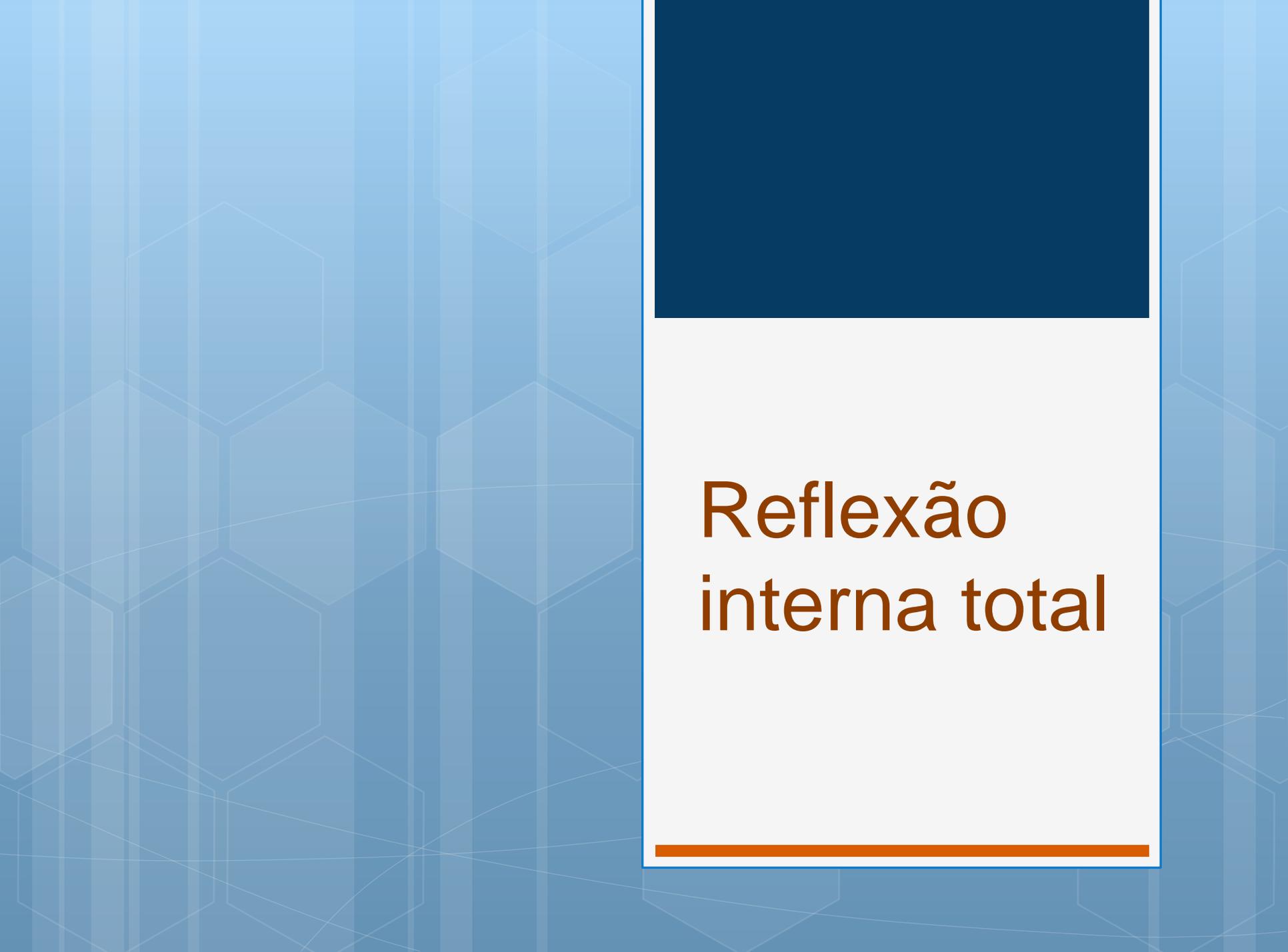
o segundo material possui um índice de refração maior que o do primeiro, Logo, o raio refratado se desvia em direção à normal e $\theta_b < \theta_a$.

Simulador desvio da luz

1. Acesse o simulador em mais ferramentas.

https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_pt_BR.html

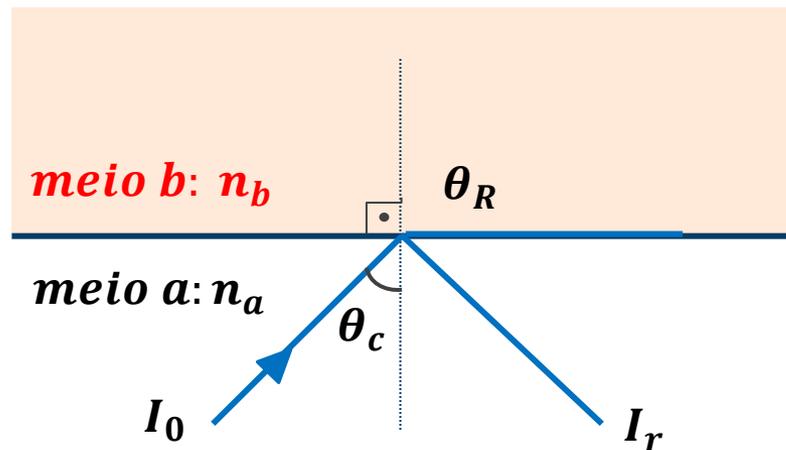
2. Experimente alterar os ângulos de incidência.
3. Altere os índices de refração e veja o que ocorre.
4. Explore novamente os dois itens anteriores, alterando o comprimento de onda.
5. No canto inferior esquerdo da tela existem medidores de intensidade e tempo (forma da onda)



Reflexão interna total

Reflexão interna total da luz

- Pode ocorrer quando um raio luminoso que se propaga de um meio com índice de refração (n_a) incide em um meio de refração n_b com $n_a > n_b$.



*Reflexão total
condição:*

$$n_a > n_b$$

água > ar

vidro > ar

Na lei de Snell ($\theta_R = 90^\circ$)

$$n_a \operatorname{sen}\theta_c = n_b \operatorname{sen}90 \quad \rightarrow \quad \operatorname{sen}\theta_c = \frac{n_b}{n_a}$$

$$\theta_c = \operatorname{arcsen}\left(\frac{n_b}{n_a}\right) \quad \text{reflexão total}$$

θ_c : ângulo crítico para reflexão total;

n_a : índice de refração do meio um;

n_b : índice de refração do meio dois;

$n_b < n_a$

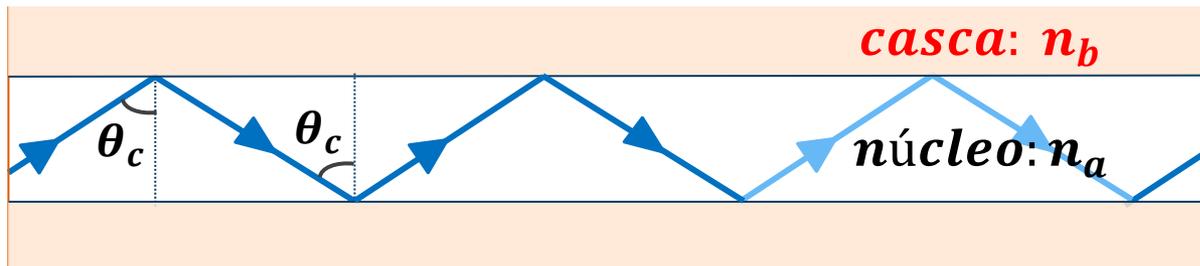
Aplicações: fibras ópticas

- **Utilizam o ângulo crítico de incidência** para transmitir a luz a grandes distâncias.
- Pode ser construída em **vidro, quartzo ou polímero**.
- Composta de um **núcleo** com índice de refração (n_a) e de uma **casca** com índice de refração (n_b), sendo $n_b < n_a$.
- Através de reflexões internas sucessivas um **feixe é transmitido de uma extremo a outro** levando luz ou trazendo imagem.

Fibras ópticas

- O diâmetro aproximado de fibras ópticas utilizadas na medicina e odontologia é da ordem de $20\ \mu\text{m}$.

$$n_b < n_a$$



- **Aplicações:** exames de endoscopia, cirurgias internas guiada por imagem, sistemas de comunicação de dados.

Reflexão interna total da luz



- Os dois primeiros raios refletidos não foram mostrados.



Dispersão

Dispersão

- A velocidade da luz no interior de um material varia com o comprimento de onda.
- Portanto, o índice de refração de um material depende do comprimento de onda.





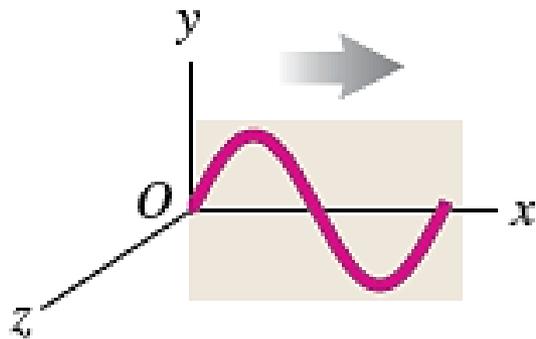
Polarização

Polarização

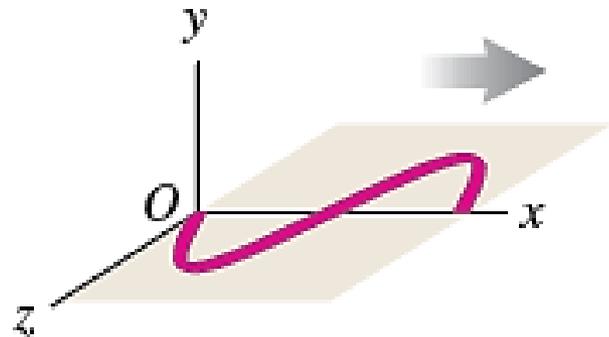
- A polarização é uma característica de todas as ondas eletromagnéticas.
- Quando uma onda possui somente deslocamentos em y , dizemos que ela é **linearmente polarizada** ao longo da direção y .
- Sempre definiremos a direção de polarização de uma onda eletromagnética como a direção do vetor campo elétrico \vec{E} .
- Quase todos os detectores de ondas eletromagnéticas funcionam pela ação da força elétrica sobre os elétrons do material.

Polarização

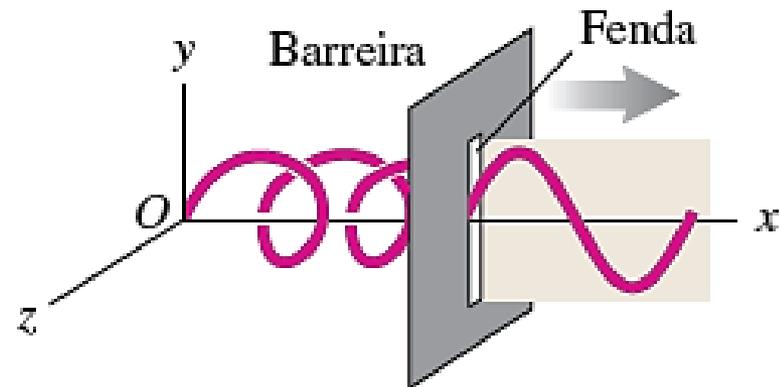
(a) Onda transversal polarizada linearmente na direção y



(b) Onda transversal polarizada linearmente na direção z

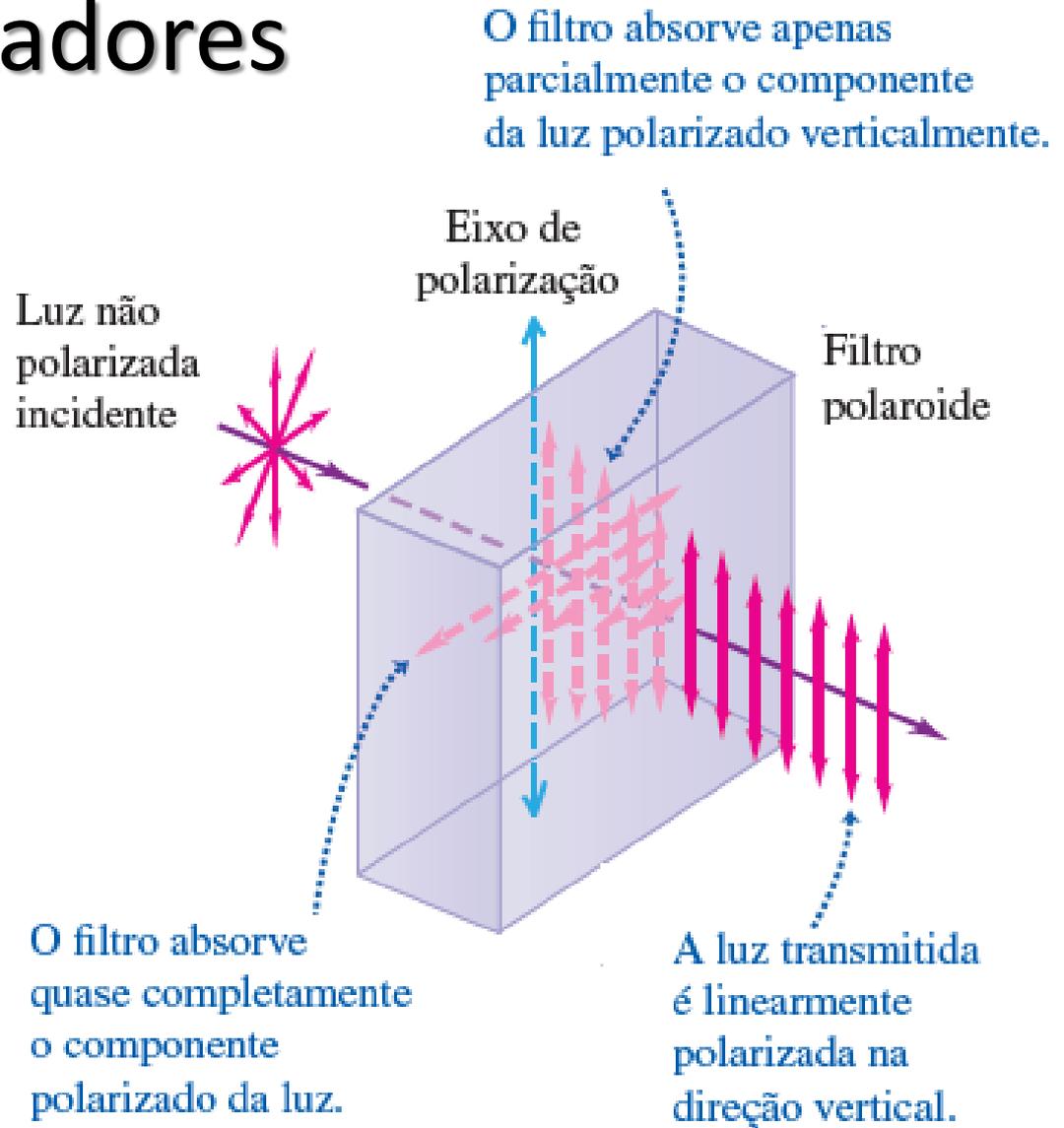


(c) A fenda funciona como um filtro polarizador, deixando passar somente as ondas polarizadas na direção y .



Filtros polarizadores

- Fontes comuns emitem luz não polarizada.
- O filtro mais comum é o Polaróide.
- Um filtro ideal deixa passar 100% em uma única direção.



Filtros polarizadores

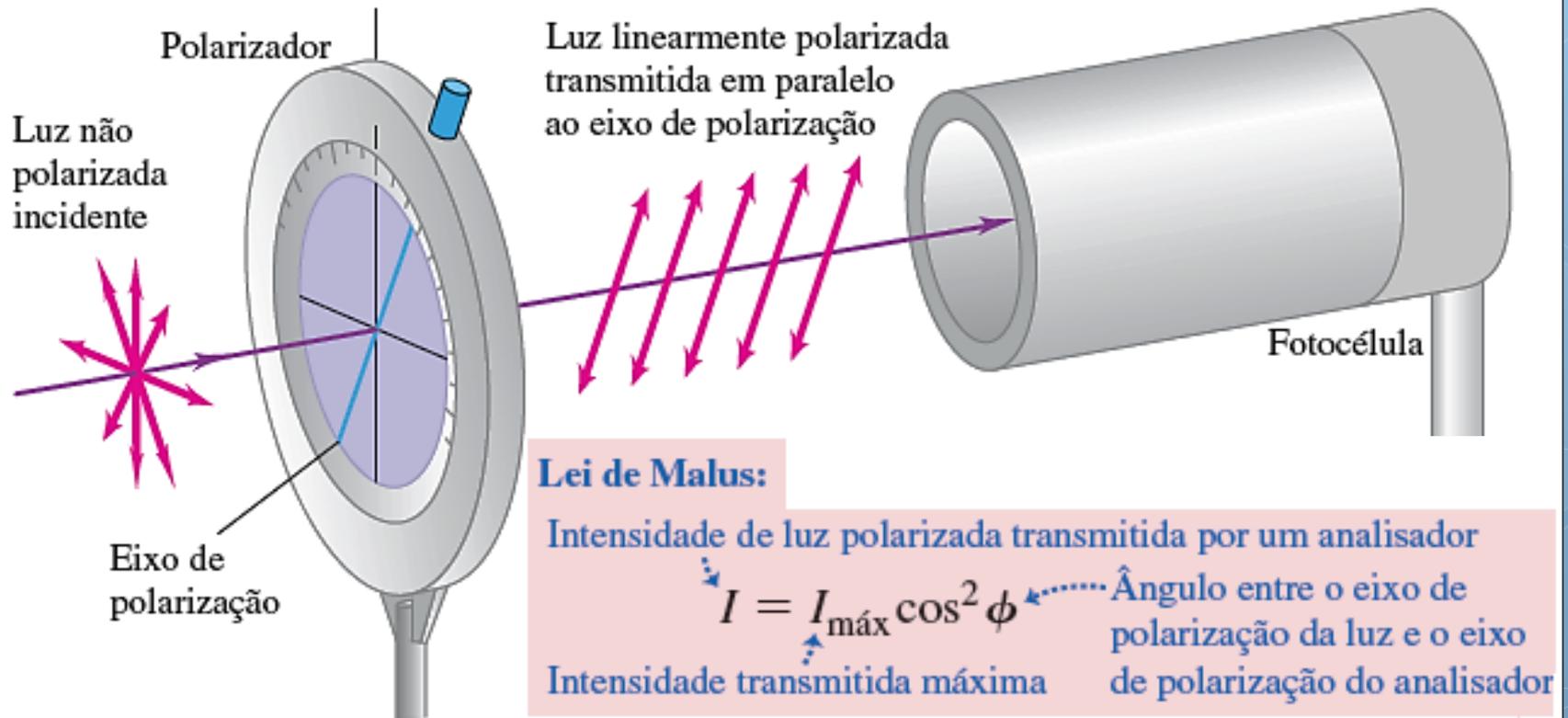


Figura 33.23 Luz natural não polarizada incidindo sobre um filtro polarizador. A fotocélula mede a intensidade da luz linearmente polarizada transmitida.

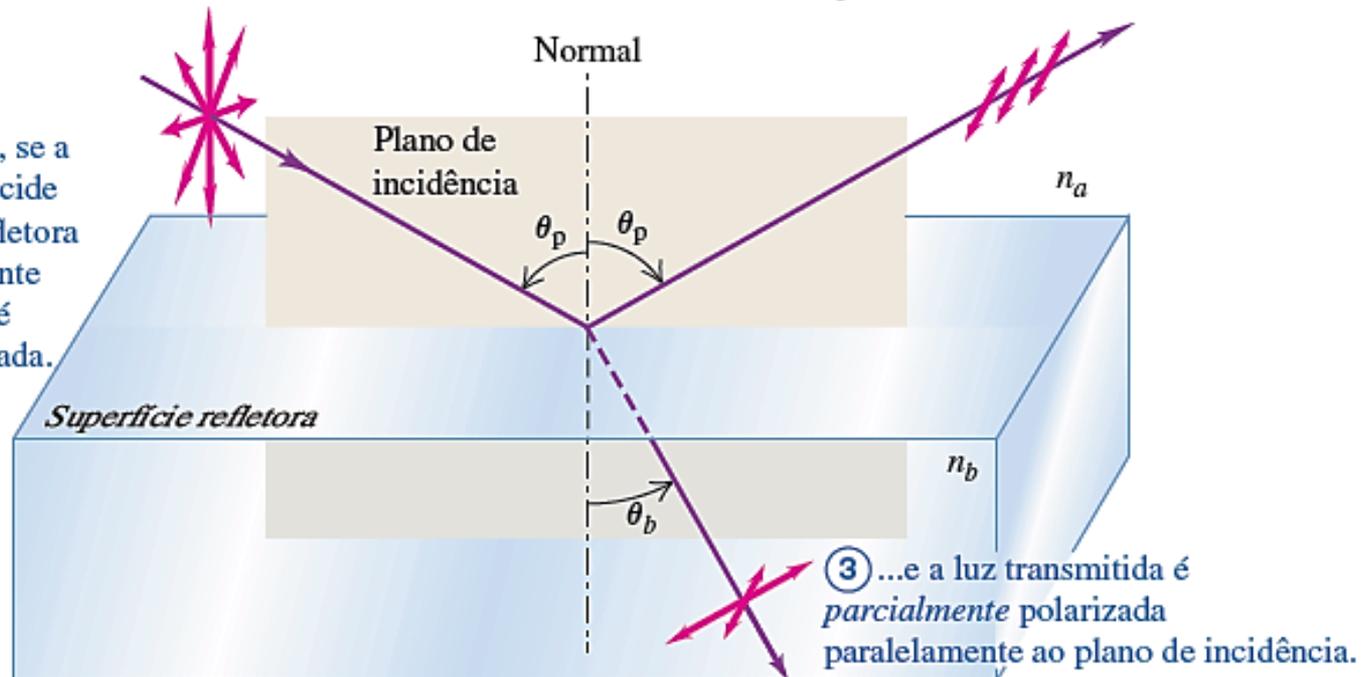
Polarização por reflexão

- 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...

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

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.



Lei de Brewster para polarização ($\theta_b = 90^\circ - \theta_p$)

$$n_a \operatorname{sen}\theta_p = n_b \operatorname{sen}\theta_b$$

$$n_a \operatorname{sen}\theta_p = n_b \operatorname{sen}(90^\circ - \theta_p)$$

$$n_a \operatorname{sen}\theta_p = n_b \operatorname{cos}\theta_p$$

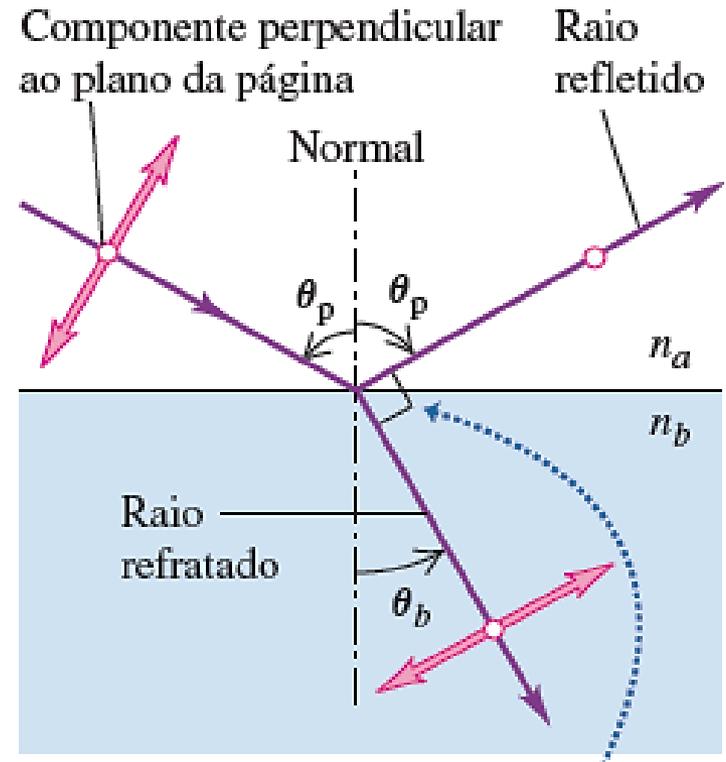
$$\theta_p = \operatorname{arctg}\left(\frac{n_b}{n_a}\right)$$

Lei de Brewster

θ_p : ângulo de polarização.

n_a : índice de refração do meio a.

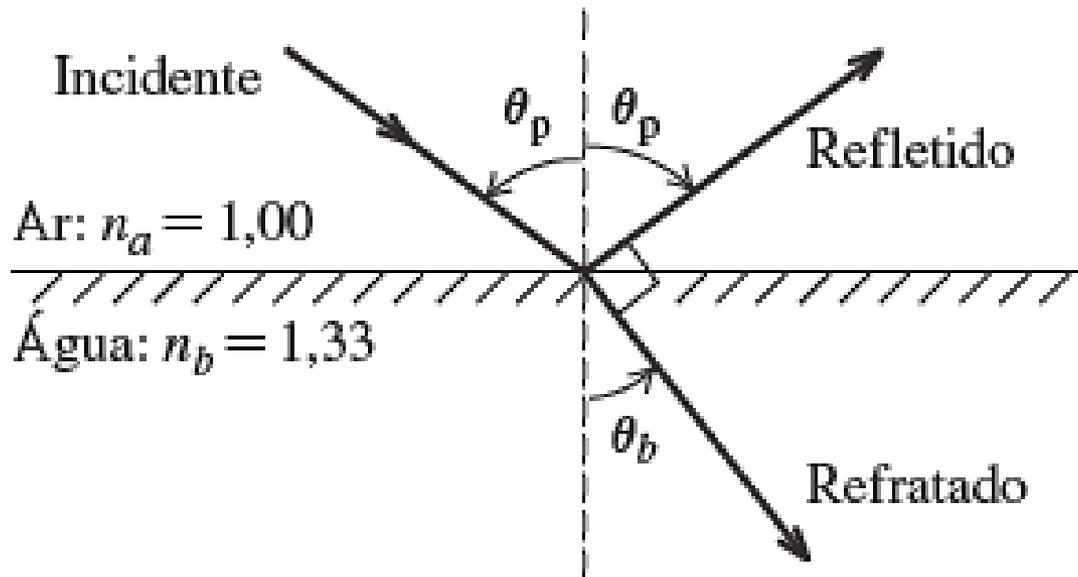
n_b : índice de refração do meio b.



Quando a luz incide sobre uma superfície formando o ângulo de polarização com a normal, o raio refletido é perpendicular ao raio refratado, e

Exemplo 33.6

A luz solar se reflete na superfície calma de uma piscina. (a) Qual é o ângulo de incidência para que a luz refletida seja completamente polarizada? (b) Qual é o ângulo de refração correspondente?



Exemplo 33.6 (resolução)

Como a luz passa do ar para a água,
temos $n_a = 1,00$ (ar) e $n_b = 1,33$ (água).

$$\theta_p = \arctan \frac{n_b}{n_a} = \arctan \frac{1,33}{1,00} = 53,1^\circ$$

(b) O ângulo de incidência é igual ao ângulo de polarização;
portanto, o raio refletido é perpendicular ao raio refratado; logo,

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

Para depois desta aula

- Completar estudo com a leitura do capítulo 33 do livro texto (Sears vol. IV);
- Acessar Lista de exercícios no site:

profhenriquefaria.com

Obrigado pela atenção!
E bons estudos.

Referência

1. YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Sears e Zemansky Física III: Eletromagnetismo. 12 ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.

