



Electromagnetismo e Óptica

MEBiom + LMAC

Prof. Gonçalo Figueira

AULA 23 – Ondas electromagnéticas e óptica

Equação de onda e ondas electromagnéticas

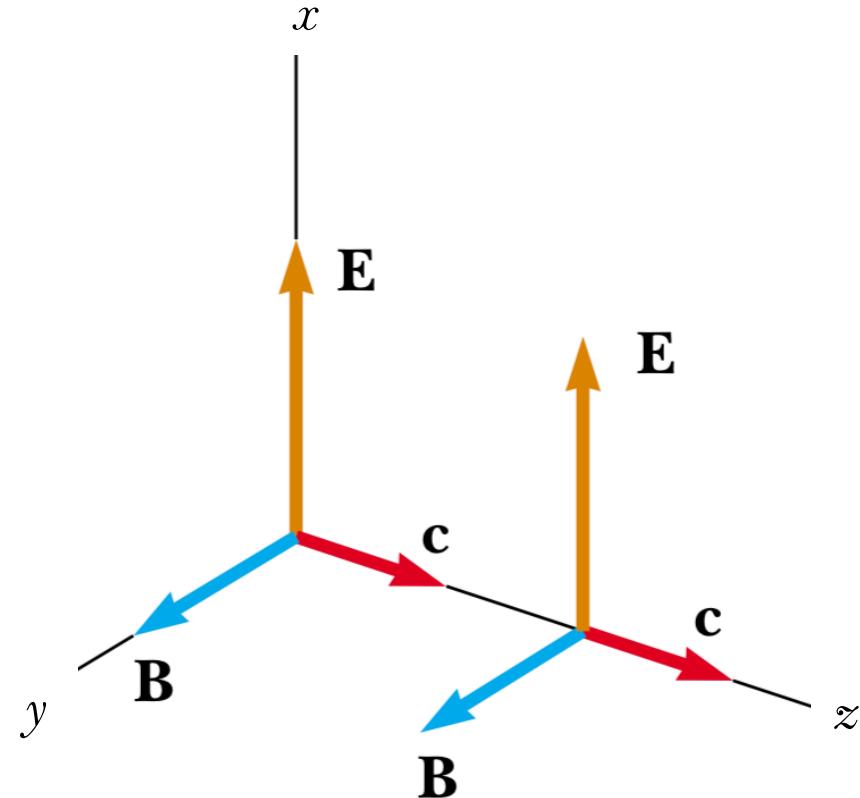
- Reflexão e transmissão das ondas em meios dieléctricos.
- Coeficientes de reflexão e transmissão
- Lei de Snell. Ângulo Crítico.
- Polarização na radiação reflectida. Ângulo de Brewster.

Popovic & Popovic Cap. 22

Serway Caps. 35.4-5, 38.6

Revisão: propriedades das ondas planas no vácuo

- $\vec{E} \perp \vec{B}$, $\vec{E} \perp \vec{e}_z$, $\vec{B} \perp \vec{e}_z$
- $\vec{P} \parallel \vec{e}_z$
- E_x e B_y são constantes em todo o espaço para um dado instante t
- Em qualquer ponto do espaço e instante de tempo: $E/B = c$
- Velocidade de propagação: $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = c$

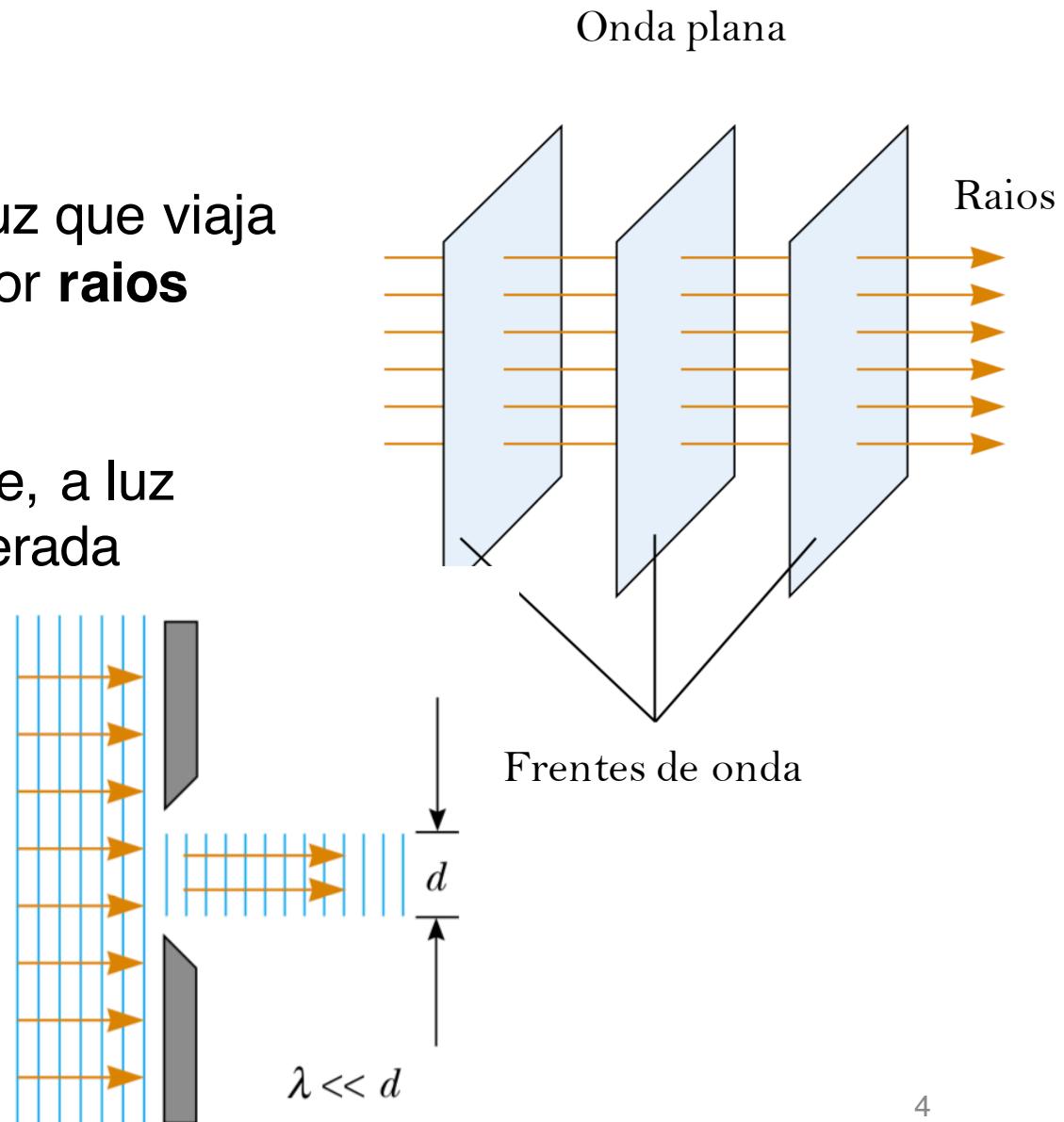


Óptica de traçado de raios ou óptica geométrica

Versão simplificada da óptica ondulatória: a luz que viaja através de um meio pode ser representada por **raios** perpendiculares ás frentes de onda.

Os raios são linhas rectas: num meio uniforme, a luz viaja numa direcção fixa, que só pode ser alterada quando a luz muda de meio.

Condição de validade: os objectos com que a luz interage são muito **maiores** do que o seu comprimento de onda λ .



Leis da óptica geométrica

O comportamento da luz na aproximação da óptica geométrica pode ser descrito usando três leis fundamentais.

1. Lei da transmissão

Numa região de índice de refracção constante, a luz viaja em linha recta

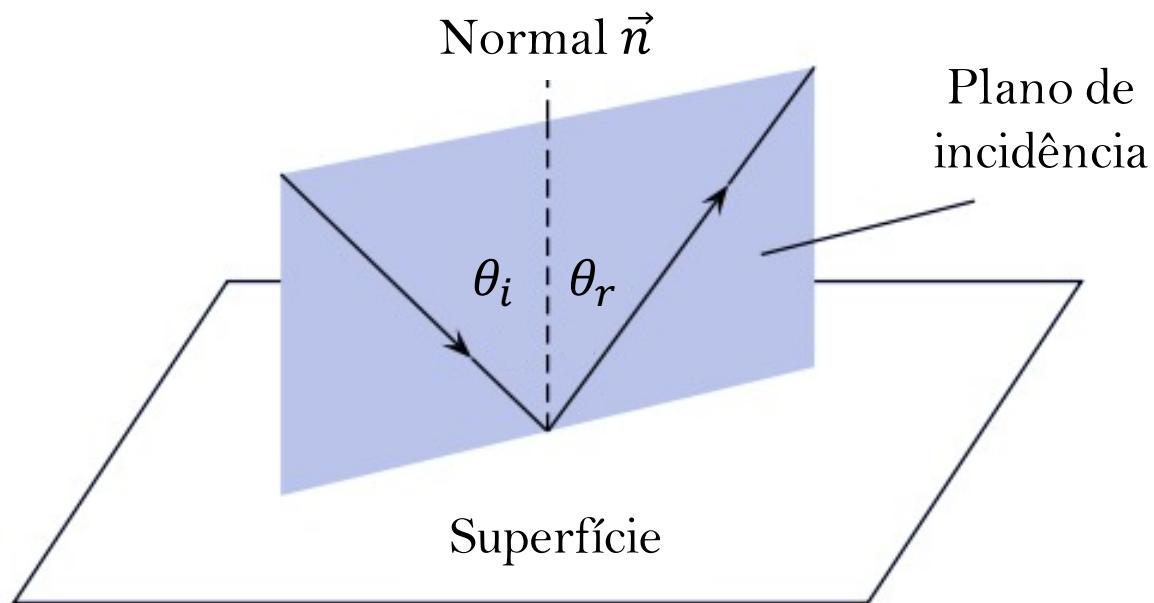
2. Lei da reflexão

3. Lei da refracção

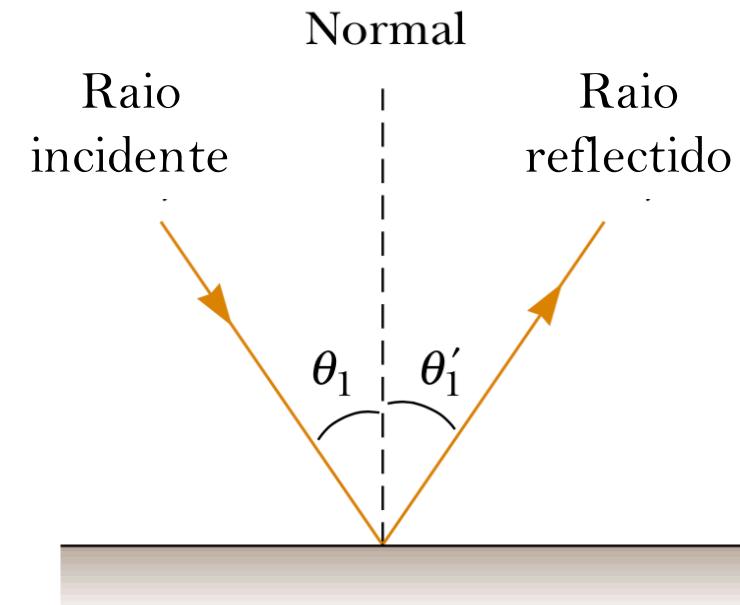
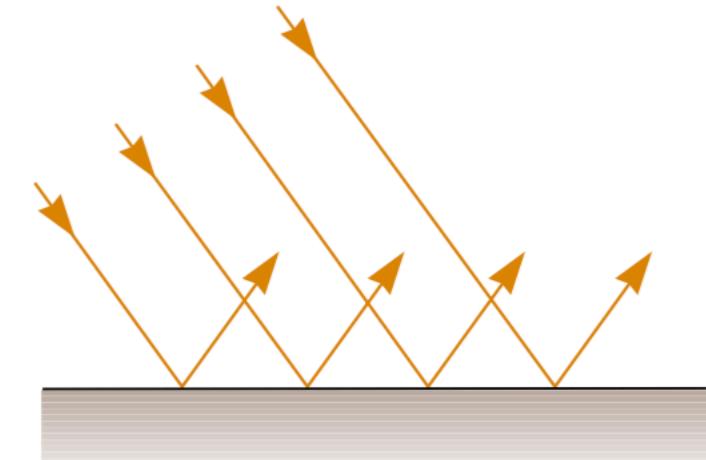
Lei da reflexão

Quando um raio encontra uma fronteira entre dois meios, parte dele é reflectido tal que

- o raio permanece no **plano de incidência**
- **ângulo de reflexão = ângulo de incidência:** $\theta_r = \theta_i$



Fronteira entre dois meios: reflexão

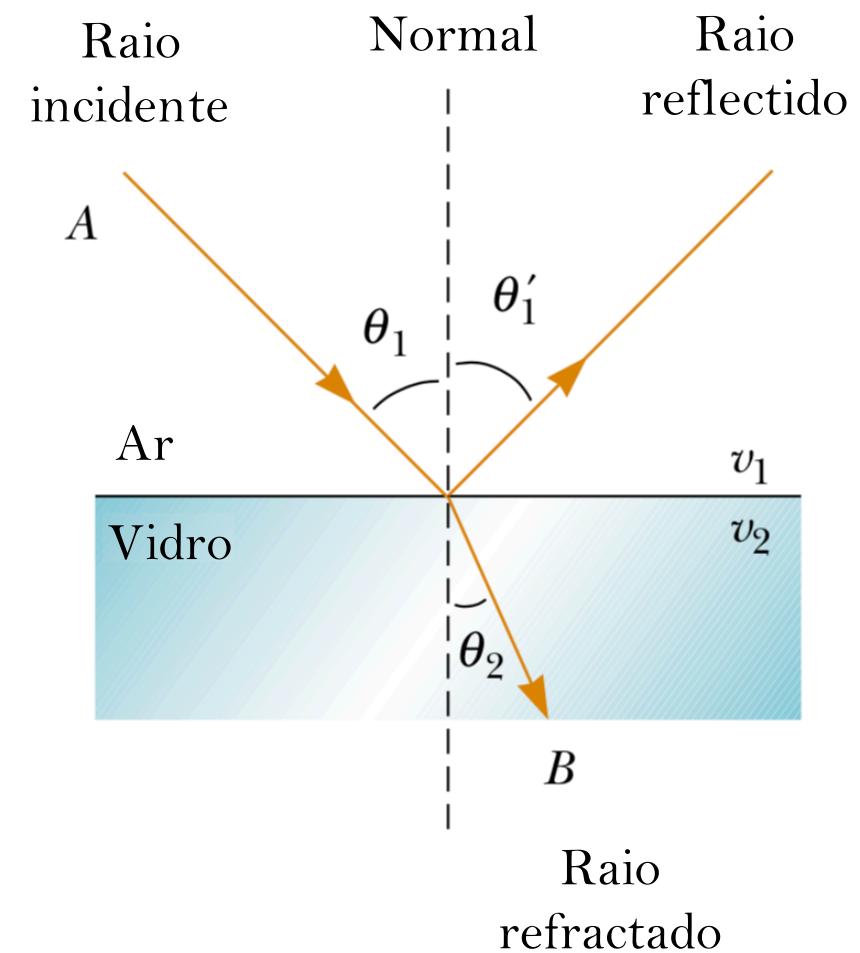


Luz reflectida e transmitida

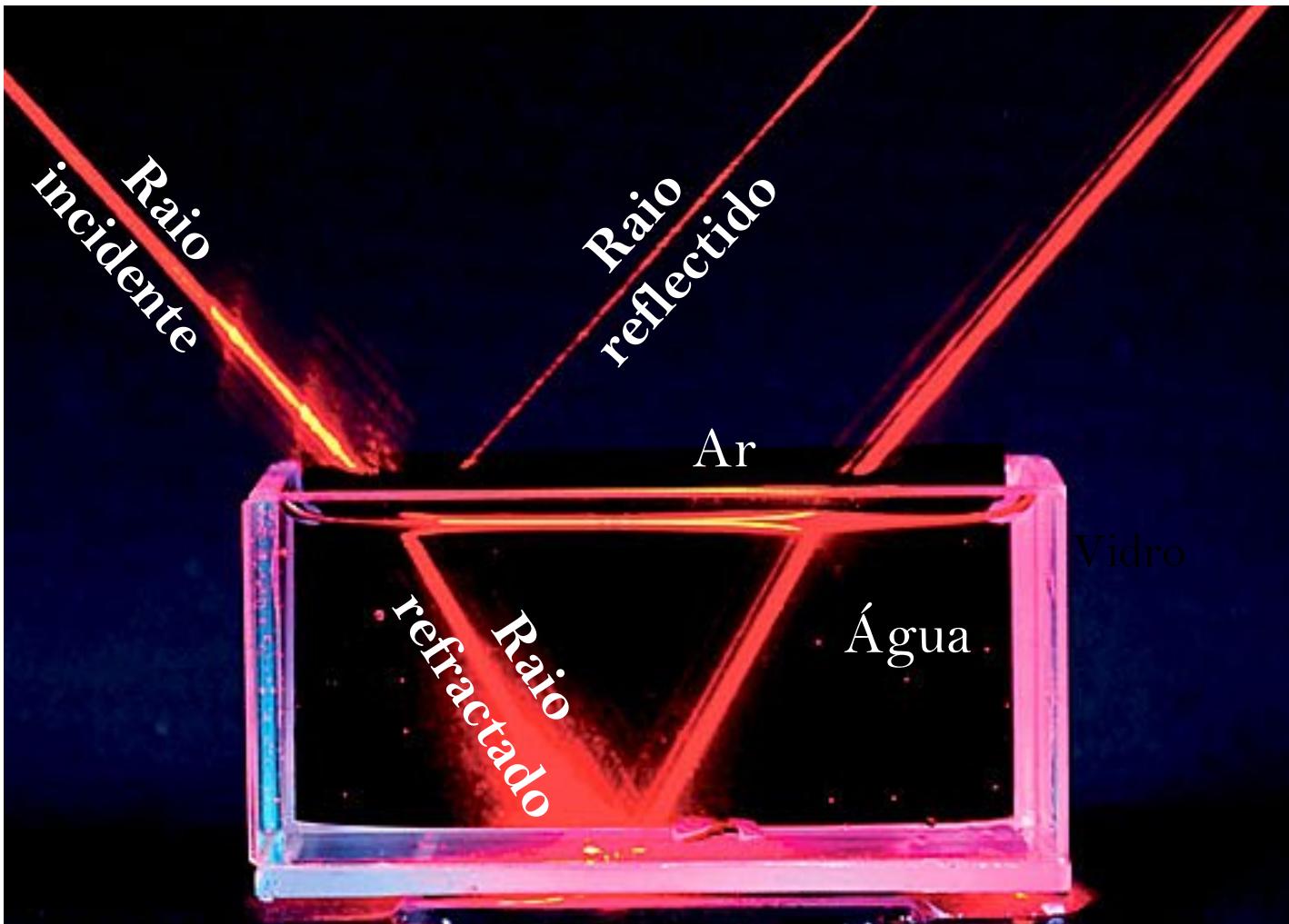
No caso mais geral, uma fracção da luz é **reflectida** e outra é **transmitida** (ou refractada). Assim, para um campo eléctrico incidente E_i

- $\frac{E_r}{E_i} = r$ é o **coeficiente de reflexão**
- $\frac{E_t}{E_i} = t$ é o **coeficiente de transmissão**

(mais na próxima aula)



Luz reflectida e transmitida



Lei da refracção

Quando um raio encontra uma fronteira entre dois meios, parte dele é **transmitido** tal que:

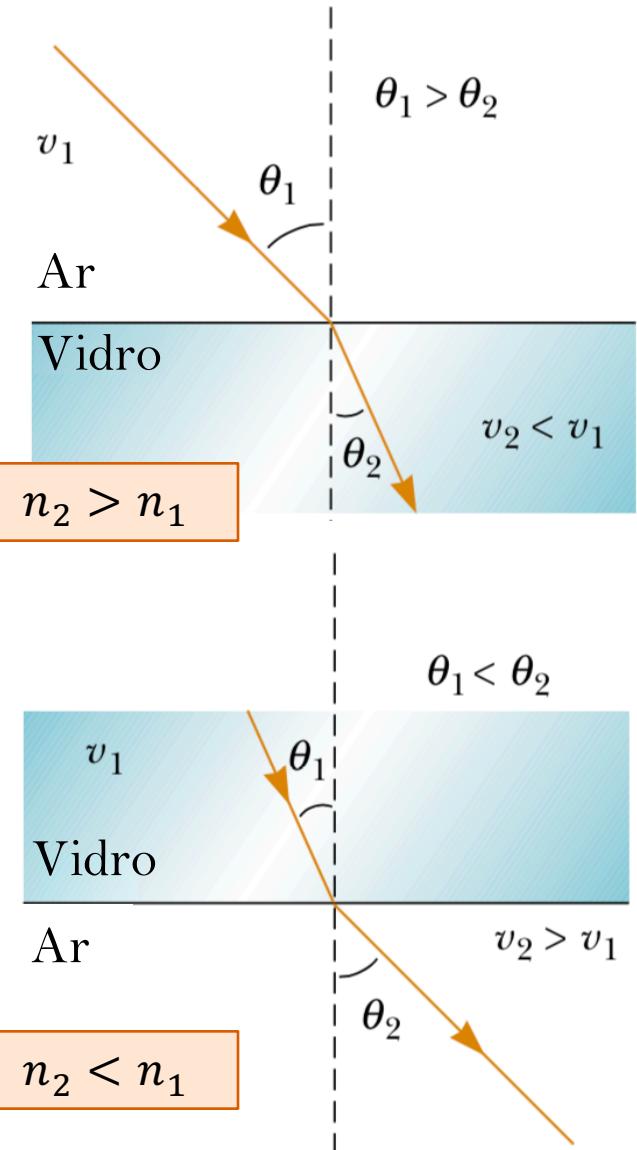
- o raio permanece no **plano de incidência**
- a relação entre os ângulos de incidência e refracção é

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$$

Lei de Snell

Quando a luz muda de um meio n_1 para n_2 :

- Se $n_2 > n_1$: raio **aproxima-se** da normal
- Se $n_2 < n_1$: raio **afasta-se** da normal

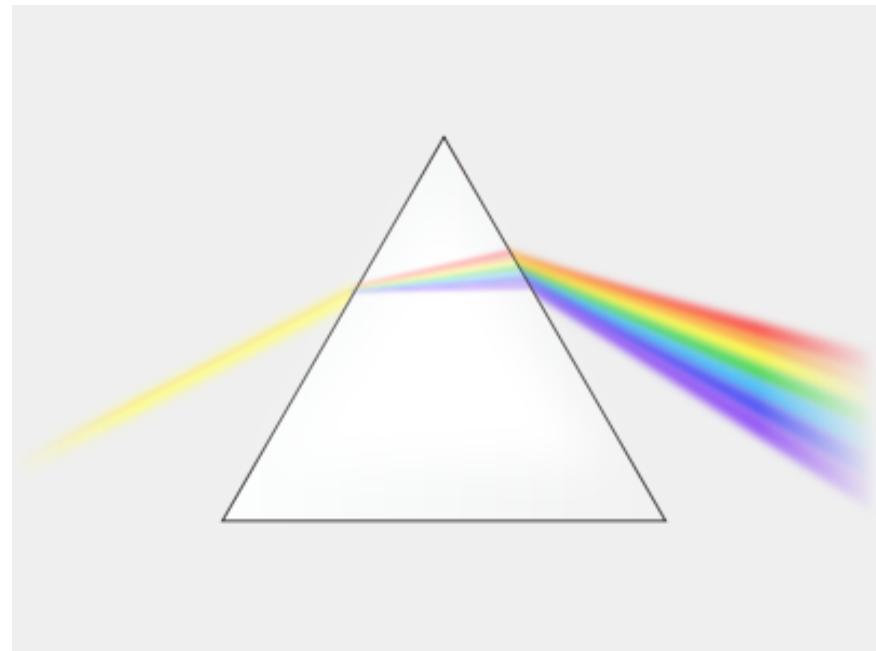


Refracção e dispersão

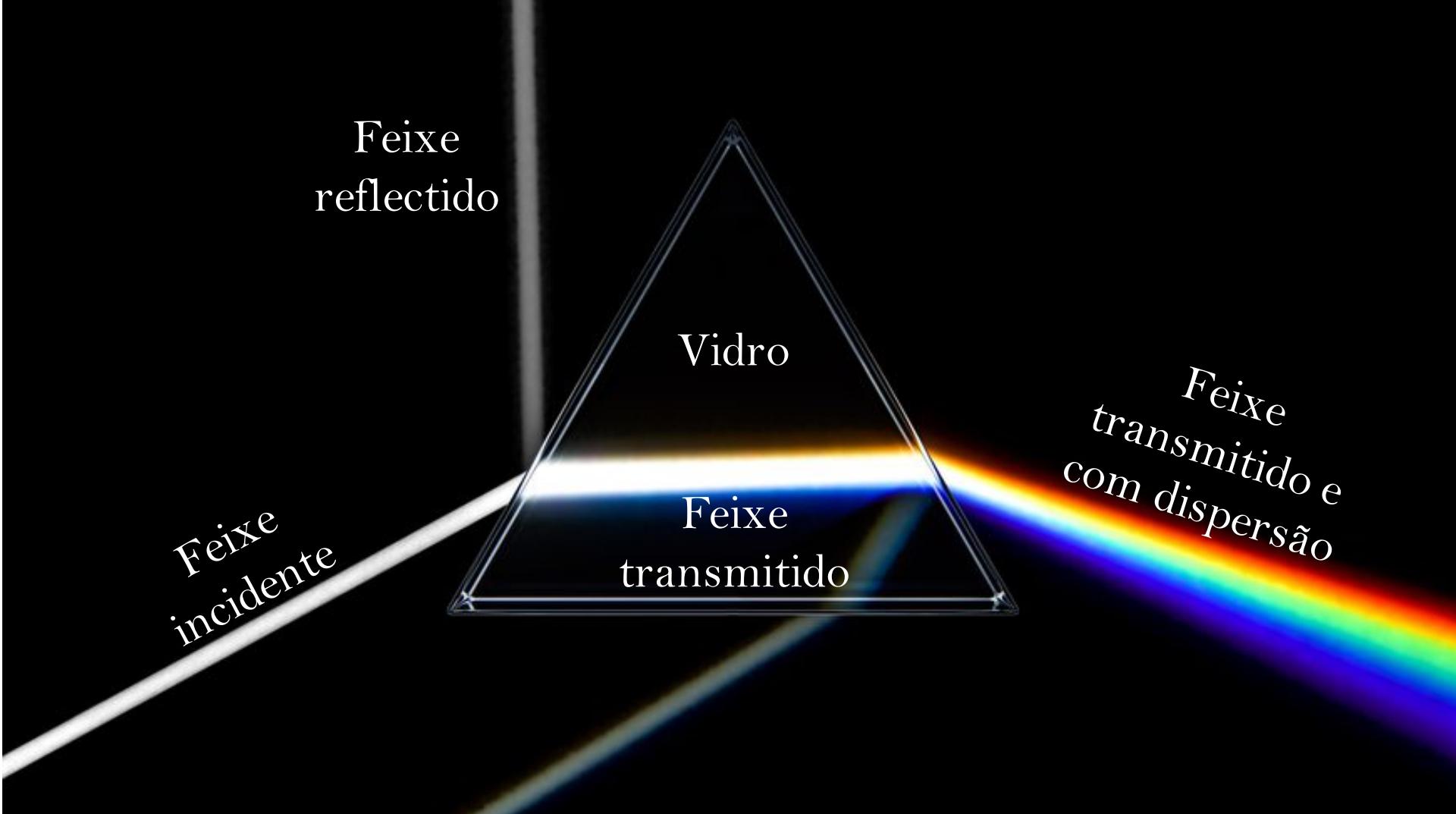
Em materiais onde existe dispersão, o índice de refracção depende da frequência. Para luz a passar do ar ($n \approx 1.00$) para um meio dispersivo ($n \equiv n(\omega)$):

$$\sin \theta_i = n(\omega) \sin \theta_r \Leftrightarrow \sin \theta_r = \frac{\sin \theta_i}{n(\omega)}$$

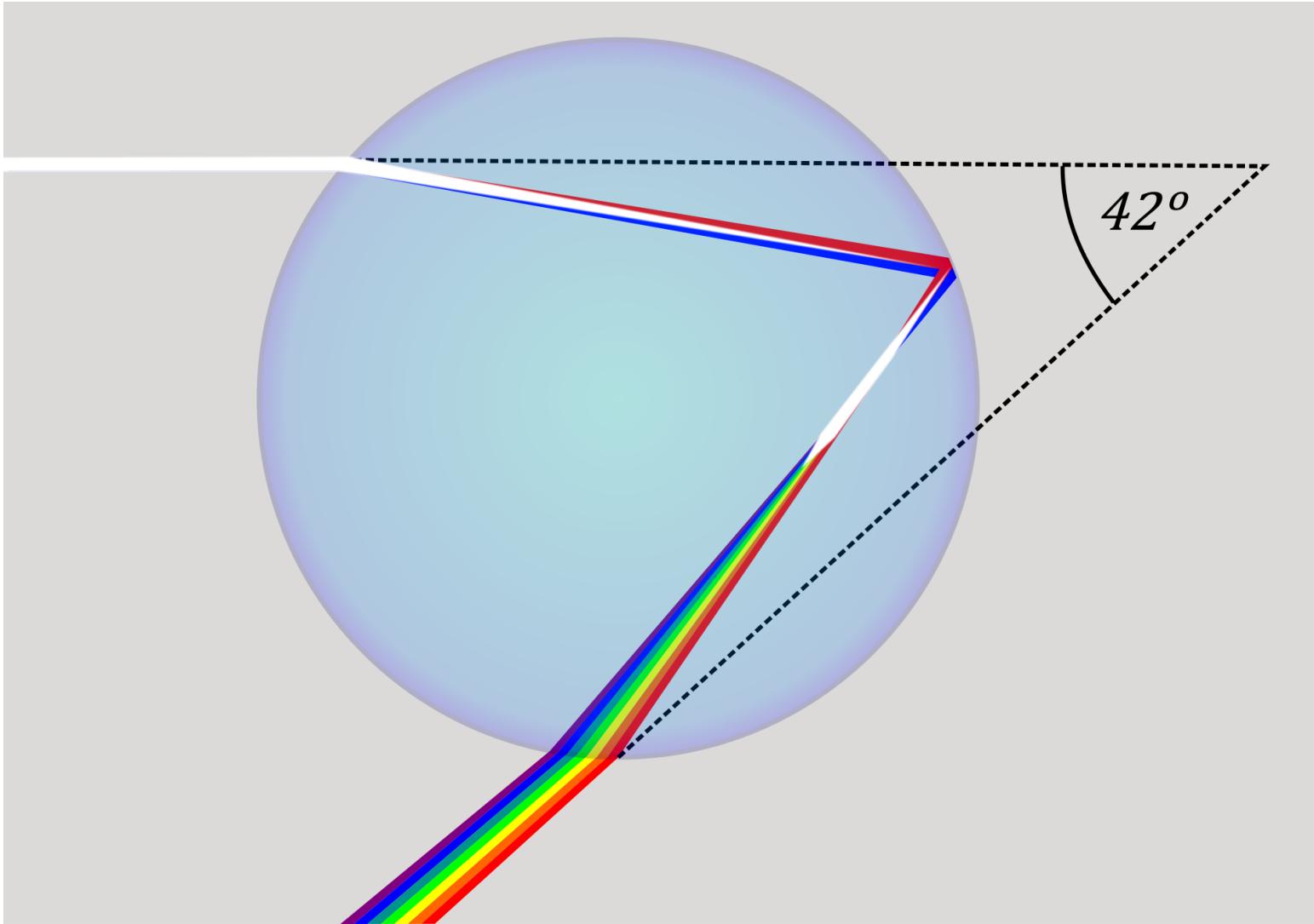
O ângulo de refracção depende da frequência. O efeito vê-se bem com um prisma, que consiste em duas refracções seguidas.



Reflexão, refracção e dispersão num prisma



Arco-íris: refracção dupla e reflexão em gotas de água



Ângulo crítico e reflexão interna total

Para $n_2 < n_1$ (só neste caso!) há um limite (90°) para o valor máximo de que o raio refratado se pode afastar da normal:

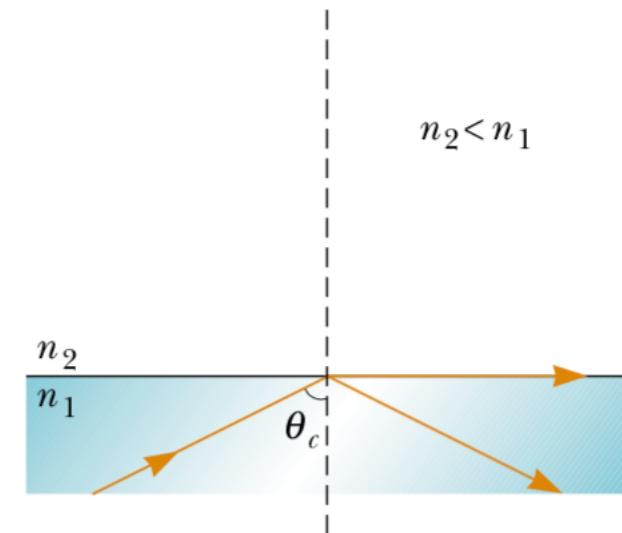
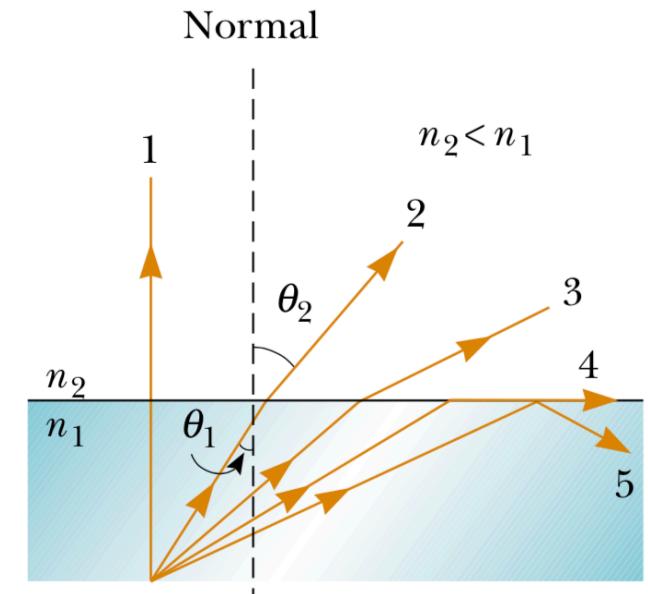
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

Para esse ângulo: $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$

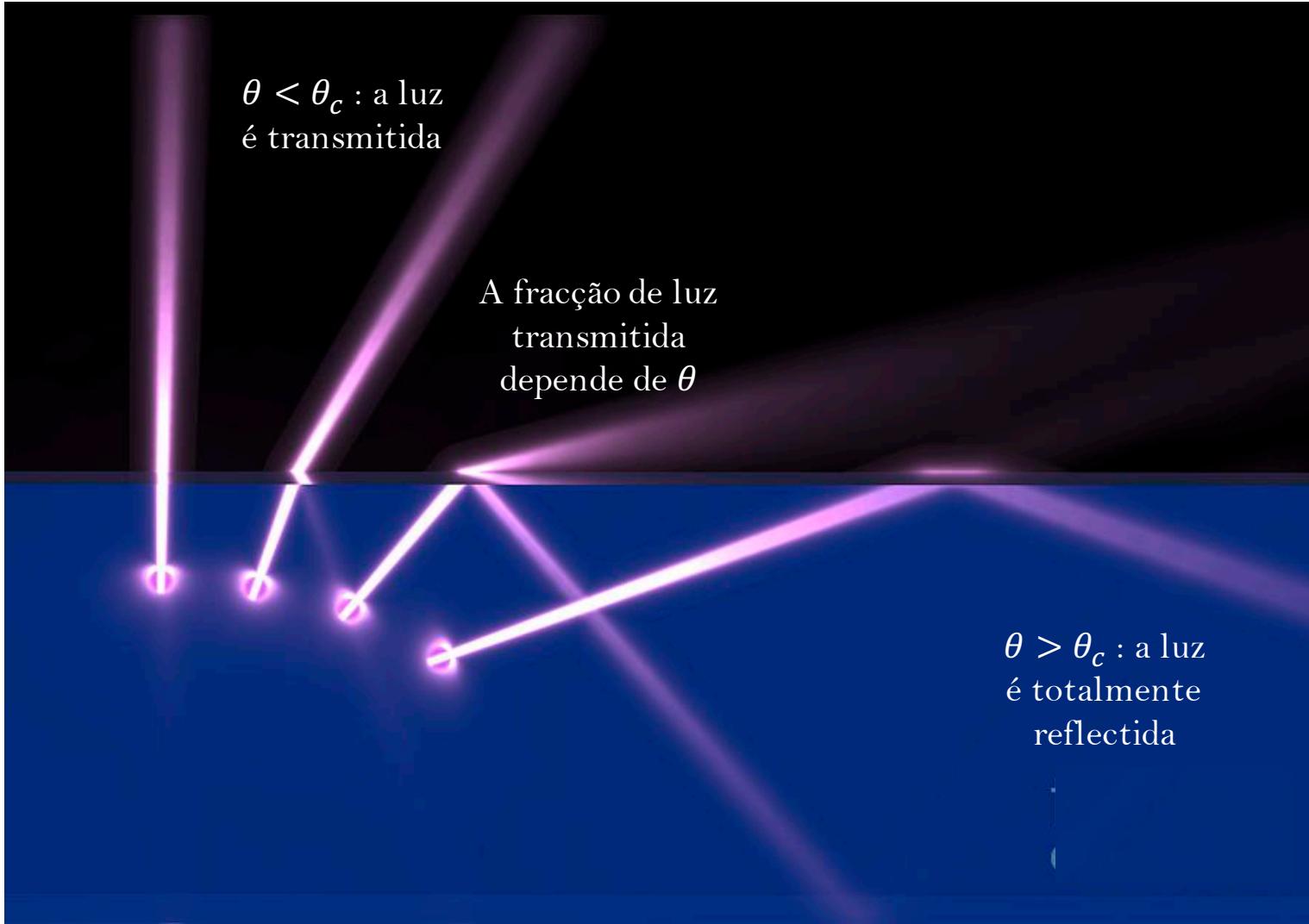
Ângulo crítico para reflexão interna total

Para valores $\theta_i > \theta_c$ o raio não pode ser transmitido e é totalmente reflectido de volta para o interior do meio 1:
reflexão interna total

Geometria para reflexão interna total



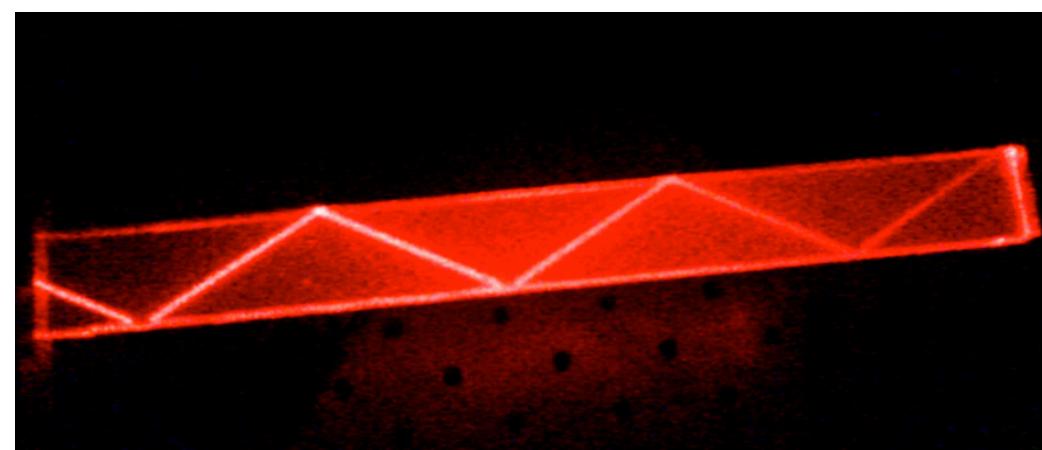
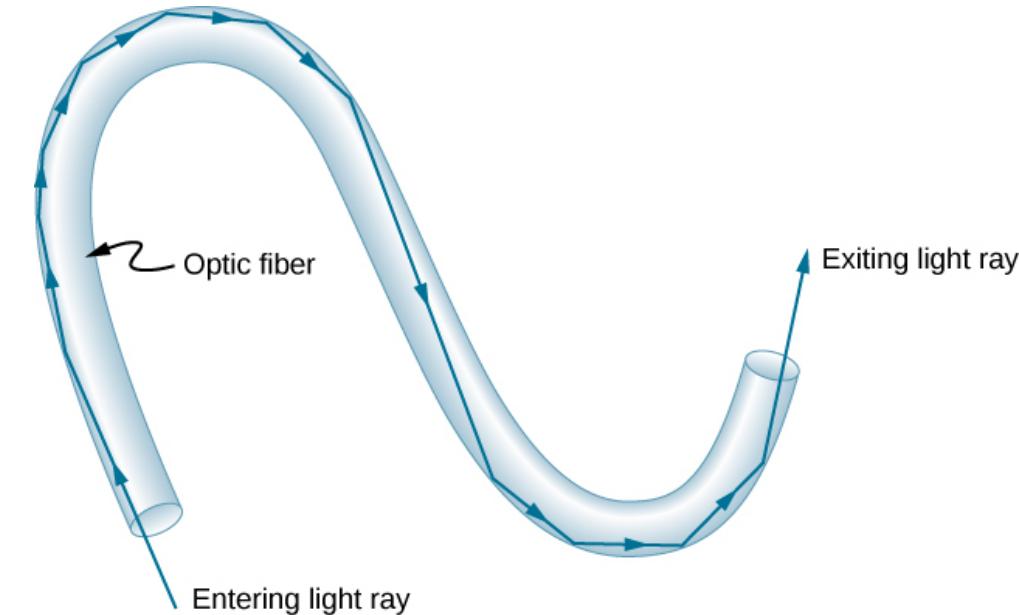
Ângulo crítico e reflexão interna total



Aplicações: fibras ópticas

As fibras ópticas guiam a luz ao longo de quilómetros, em trajectórias curvas e com poucas perdas.

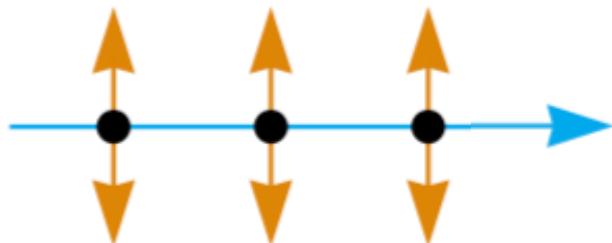
Em certas fibras, a luz é guiada através de sucessivas reflexões internas.



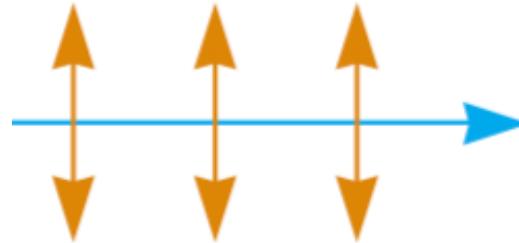
Polarização na radiação reflectida

Quando um raio de luz **não-polarizada** é reflectido numa superfície, a luz reflectida pode ser

- Não-polarizada ($\theta_{in} = 0$)
- Parcialmente polarizada ($\theta \neq 0$)
- Completamente polarizada (“ângulo especial”)



Luz não-polarizada



Polarização linear no
plano da imagem



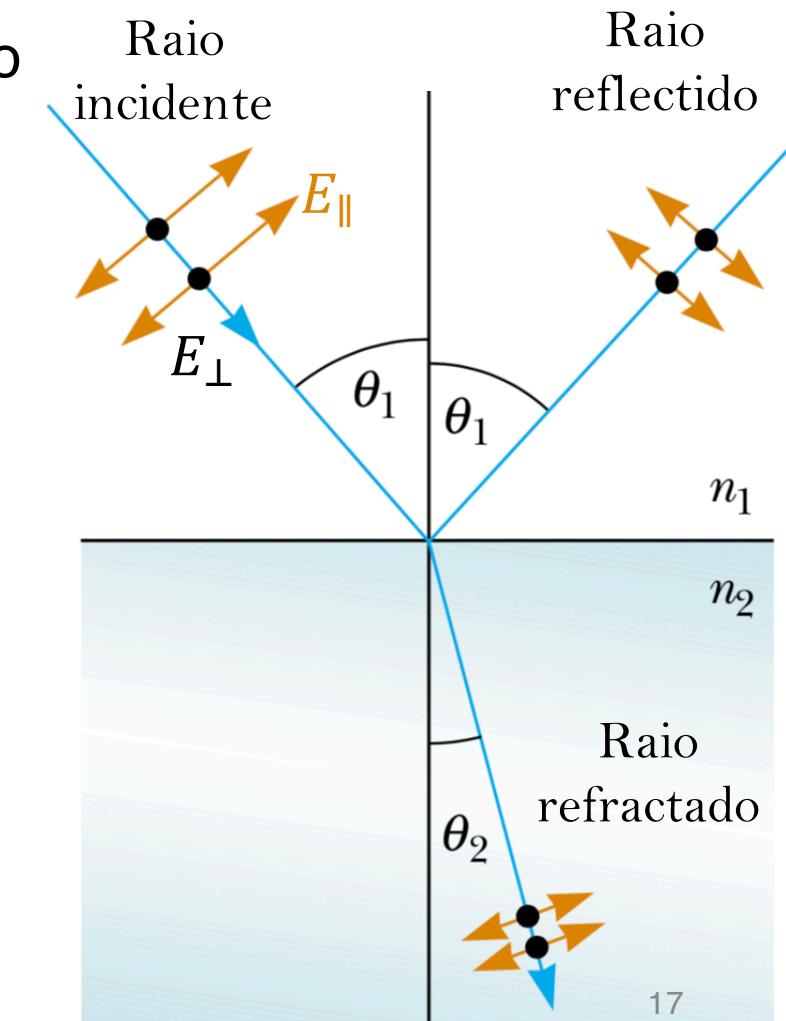
Polarização linear
perpendicular ao
plano da imagem

Polarização na radiação reflectida

Raio que incide numa superfície: parcialmente transmitido e parcialmente reflectido

A direcção (instantânea) do campo eléctrico define a direcção de polarização. Qualquer direcção pode ser expressa na soma vectorial de dois vectores ortogonais:

- um **no plano** de incidência, E_{\parallel}
- um **perpendicular ao plano** de incidência, E_{\perp}



Polarização na radiação reflectida

Verifica-se que

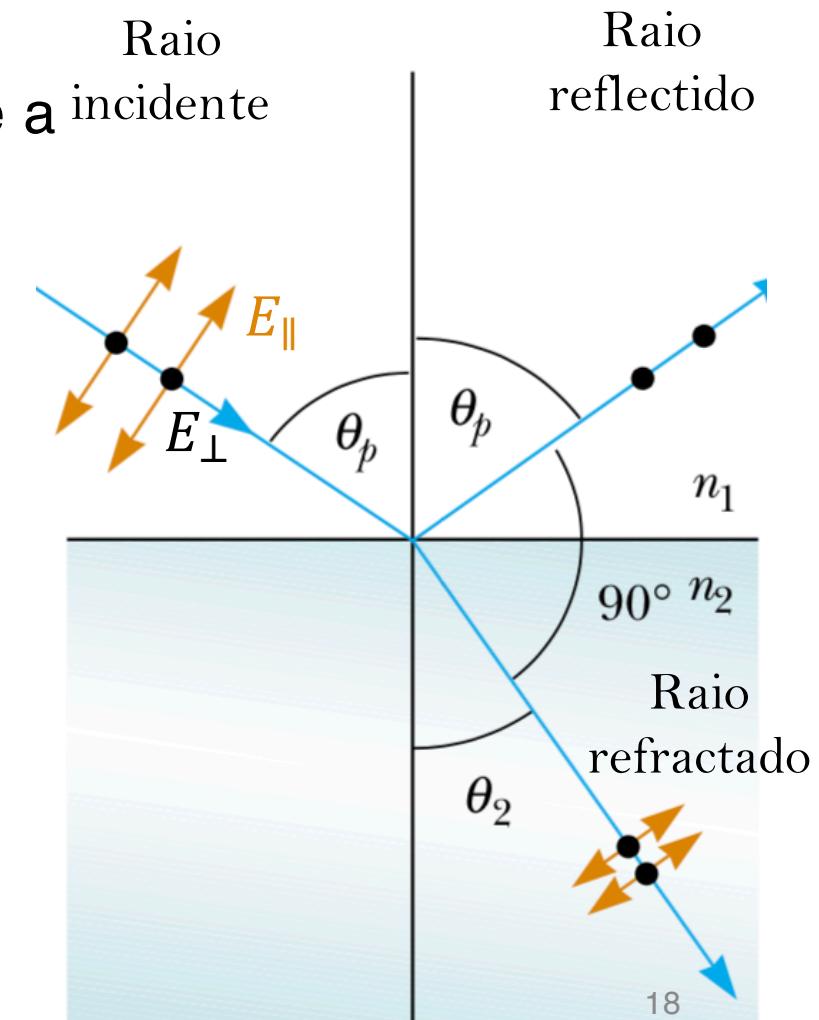
- A **componente perpendicular** E_{\perp} é mais reflectida que a incidente componente paralela E_{\parallel}
- A luz reflectida e refractada é parcialmente polarizada
- Para um ângulo específico $\theta_i = \theta_p$, a luz reflectida está completamente polarizada
- Para esse ângulo verifica-se $\theta_p + \theta_r = 90^\circ$

Calculando para o ar ($n_1 = 1$):

$$\sin \theta_p = n \sin \theta_r = n \sin(90^\circ - \theta_p) = n \cos \theta_p$$

$$n = \tan \theta_p$$

Lei de Brewster
 θ_p = ângulo de Brewster



Aplicação: bloqueio selectivo de luz reflectida com óculos de sol polarizados



Without polarized sunglasses



With polarized sunglasses