

# Óptica



Aula 5 - Formação de Imagens Ampliadas - Refração  
ewout@usp.br

# Aula passada

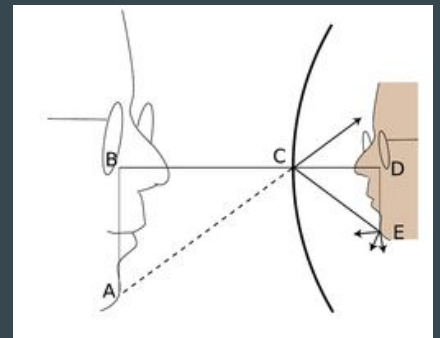
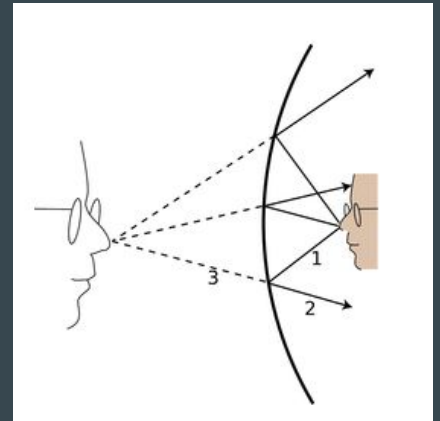
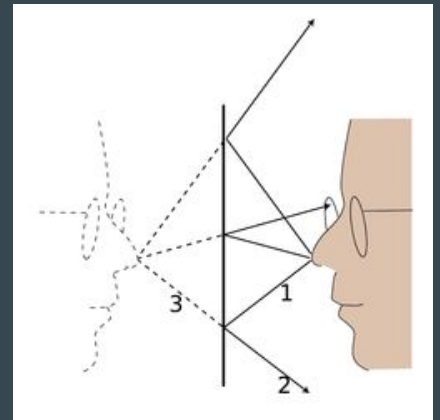
Formação de imagens em espelhos esféricos. Graficamente e pela “Lei dos espelhos” ou Eq. de Gauss

Terminologia: côncavo / convexo, imagem virtual / real, invertida / direita, ampliação

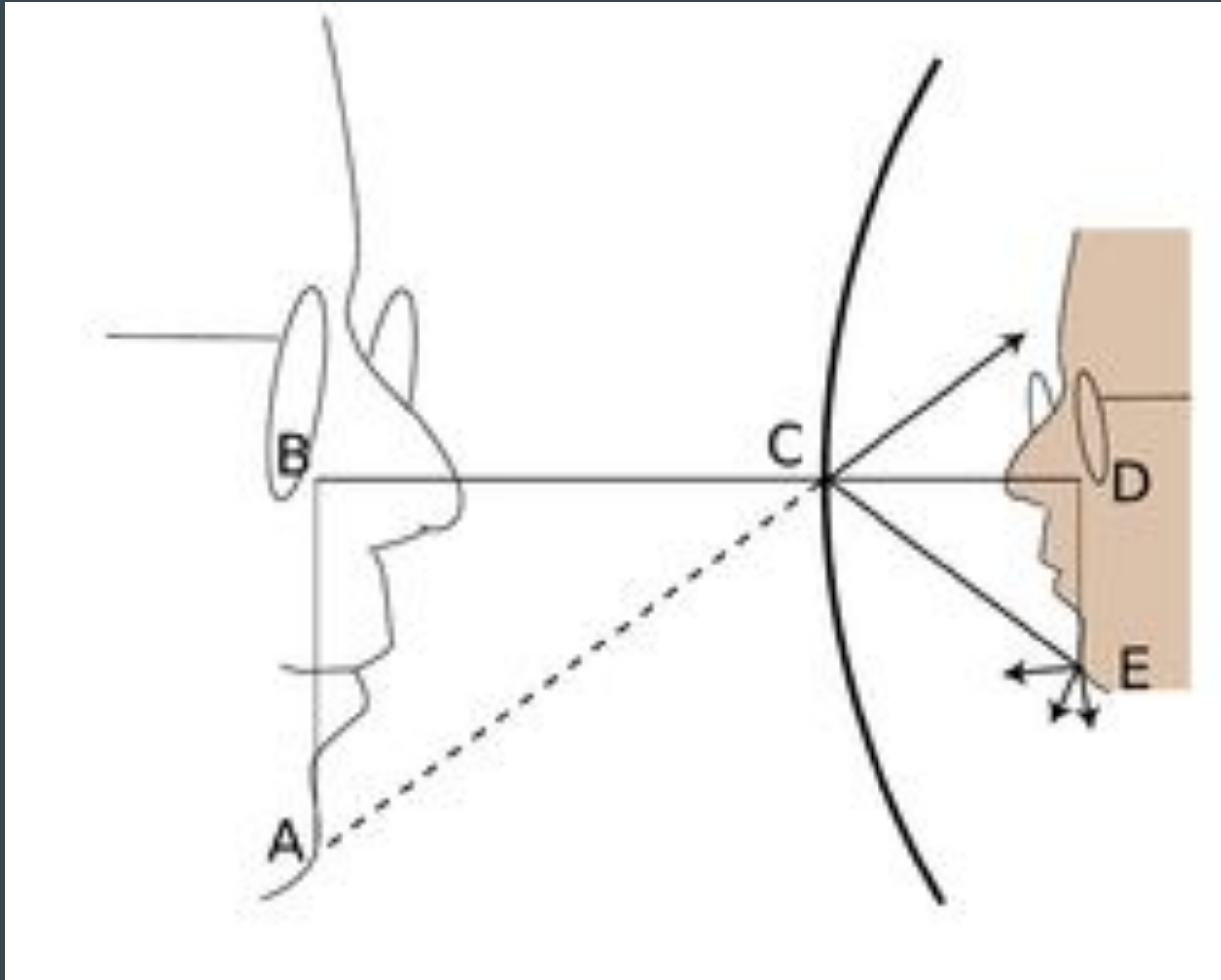
Convenção de sinais

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

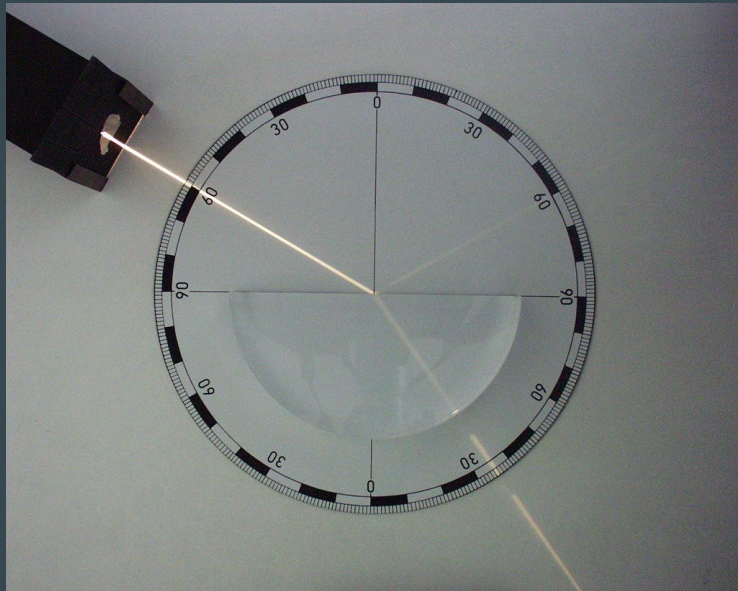
$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{p'}{p}$$



# Ampliação num espelho convergente (côncavo)

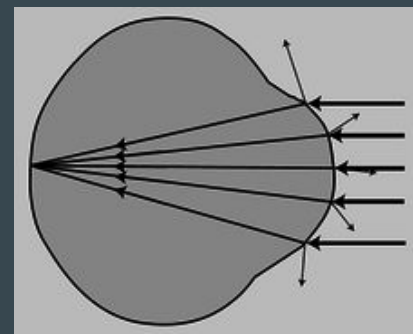
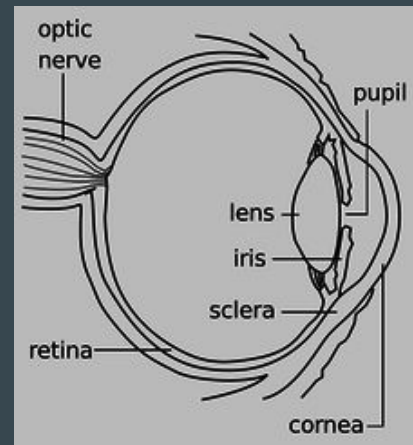
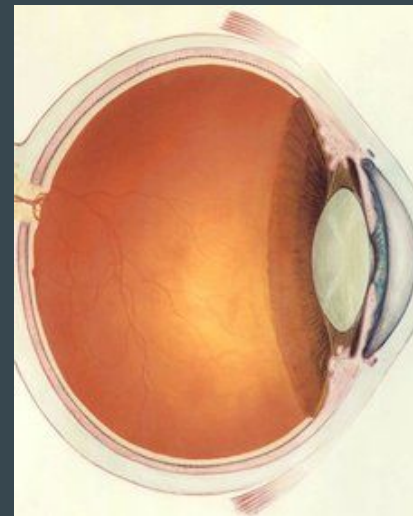


# Refração: fenomenologia



Luz que passa de um meio para outro é observada de ser

1. refletida na interface entre os meios
2. refratada (muda de direção)



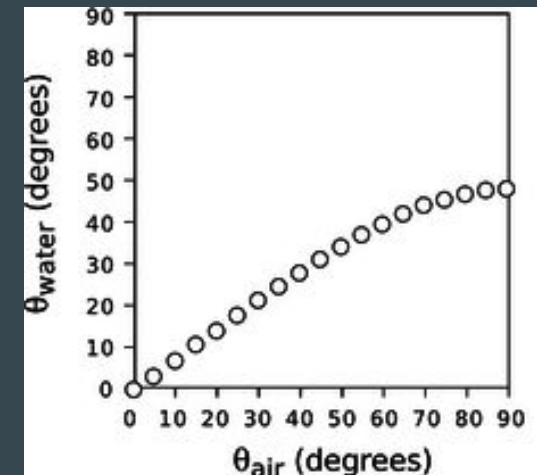
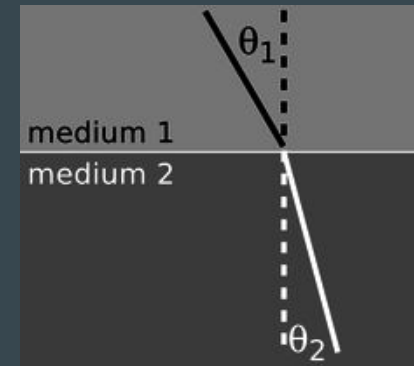
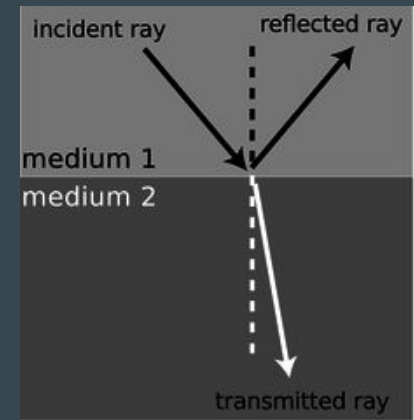
# Quais regras a refração obedece?

(note: tratamento completamente *fenomenológico*)

## 1. Regras **qualitativas**:

- podemos ordenar meios (transparentes) pelo grau em que o raio refratado é desviado para o normal
- em geral, meios mais densos desviam mais

2. Regra **quantitativa**: a Lei de Snell, com um índice de refração  $n$  que é característico do meio transparente.



$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \text{constant}$$

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

# Índice de refração

Acontece que agora sabemos que luz é uma onda, com velocidade de propagação que depende do meio.

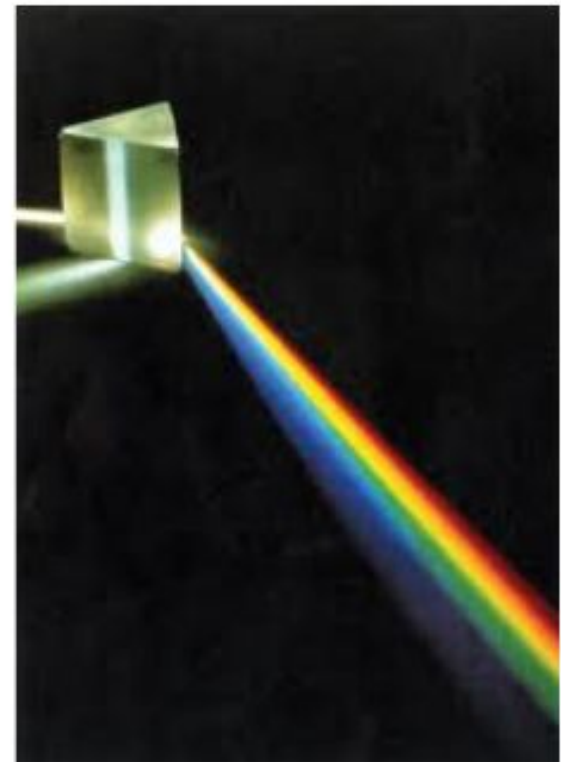
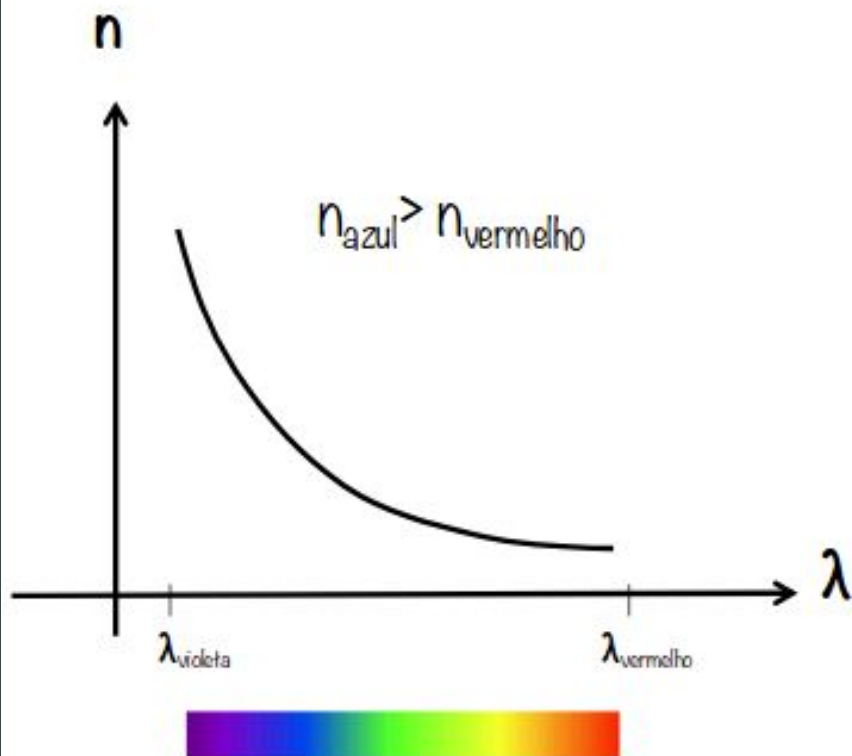
- em vácuo:  $c = 3e8$  m/s (300 mil km/s)
- num meio transparente: velocidade menor  $v$

Definir o índice de refração como  $n = c/v$  (um número a-dimensional e maior que 1).

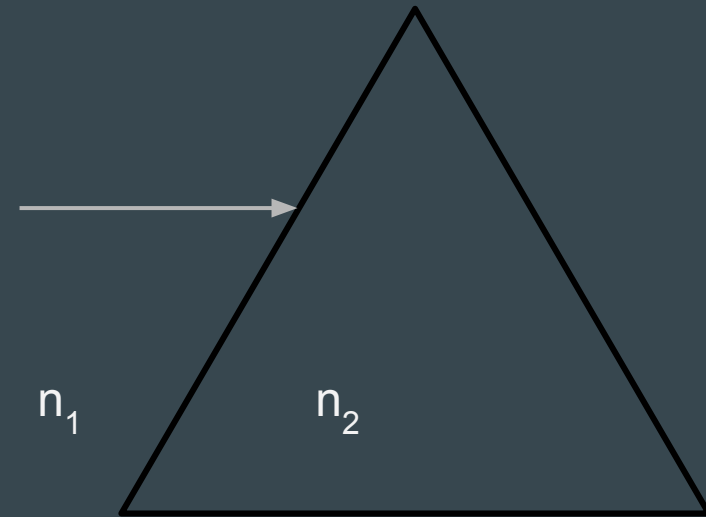
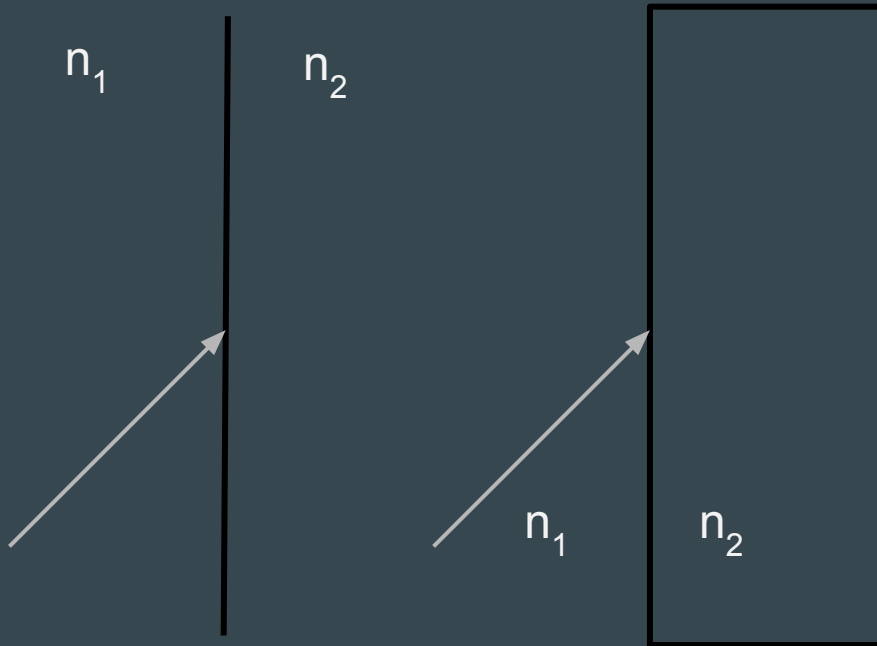
$$n_{\text{água}} = 1,33 \quad n_{\text{vidro}} = 1,5 \quad n_{\text{diamante}} = 2,4$$

O índice de refração varia com o comprimento de onda da luz (cor)

$n=n(\lambda)$  → Dispersão



# Exercício traçar raios





# Simulação

## Desvio da Luz (Phet)

mas existe um limite  $\longrightarrow \theta_{1 \text{ máximo}} = 90^\circ$

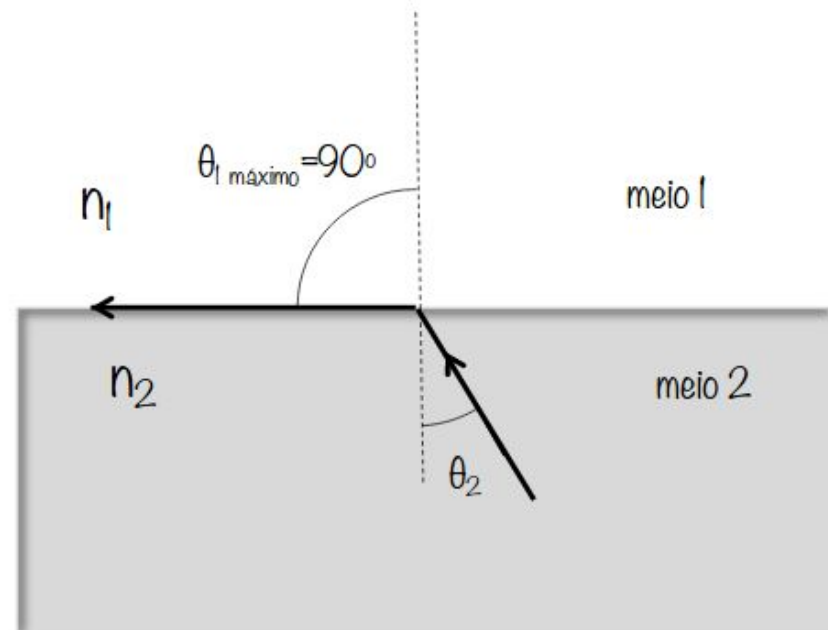
isso ocorre para  $\theta_2 = \theta_c$

$\theta_c = \text{ângulo crítico}$

$$n_1 \underbrace{\sin 90^\circ}_1 = n_2 \sin \theta_c$$

$$\sin \theta_c = n_1 / n_2$$

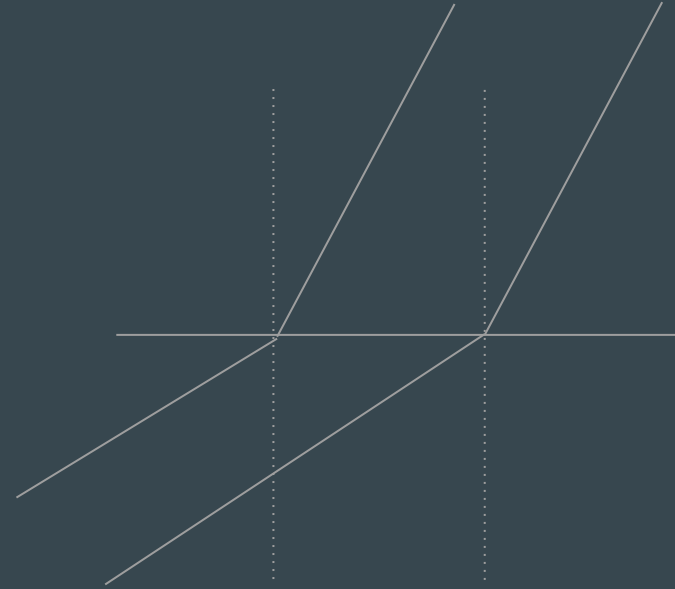
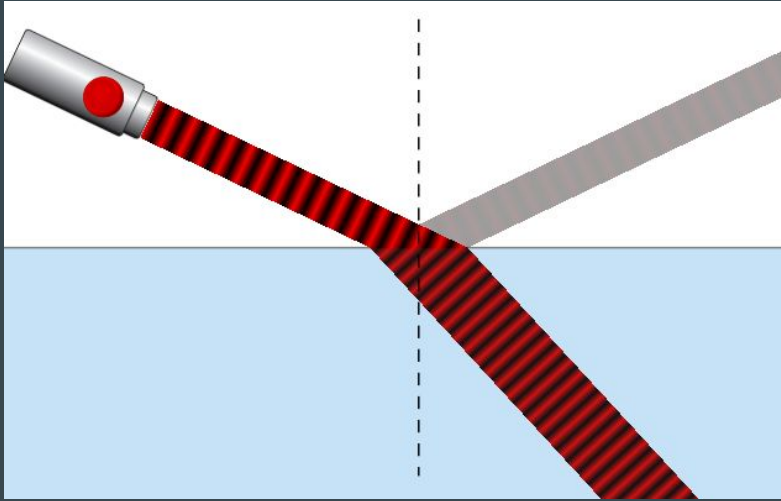
## Reflexão total interna



# Duas “deduções” da Lei de Snell

1. Luz é uma onda. A velocidade diferente no outro meio “força” as frentes de onda se propagar com outro ângulo no outro meio.
2. O princípio de Fermat: “Luz escolha o trajeto que leva o menor tempo para percorrer”.

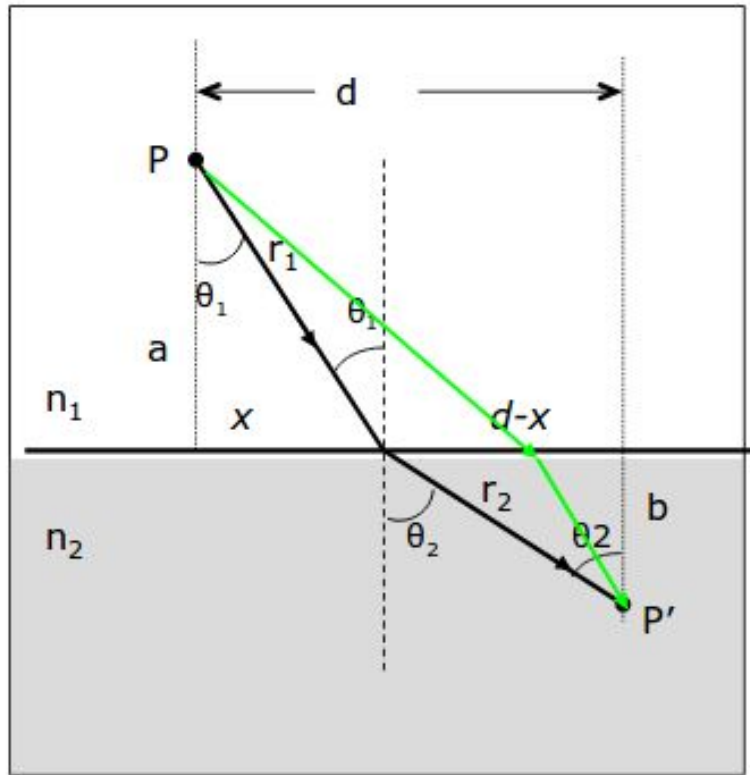
# Dedução da Lei de Snell



1.  $v = \lambda * \text{freq}$  ( $v = dx/dt = \lambda / T = \lambda * f$ )
2.  $n = c / v$
3. construção geométrica

# 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  $P'$

# Princípio de Fermat

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

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



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

Pela figura:

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

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

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

# Resumo e Vocabulário

**Refração:** o desvio da luz ao cruzar a interface de dois meios

**Índice de refração:** propriedade de materiais (transparentes). A velocidade da luz / velocidade da luz dentro do material,  $n = c/v$

**Lei de Snell**

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

# Questões para discussão

O que deve ser o índice de refração de um peixe para que é invisível para outros peixes?

Quanto mais denso um gás, quanto maior o índice de refração. Mas não faz sentido propor que  $n \sim$  densidade. Porque não?

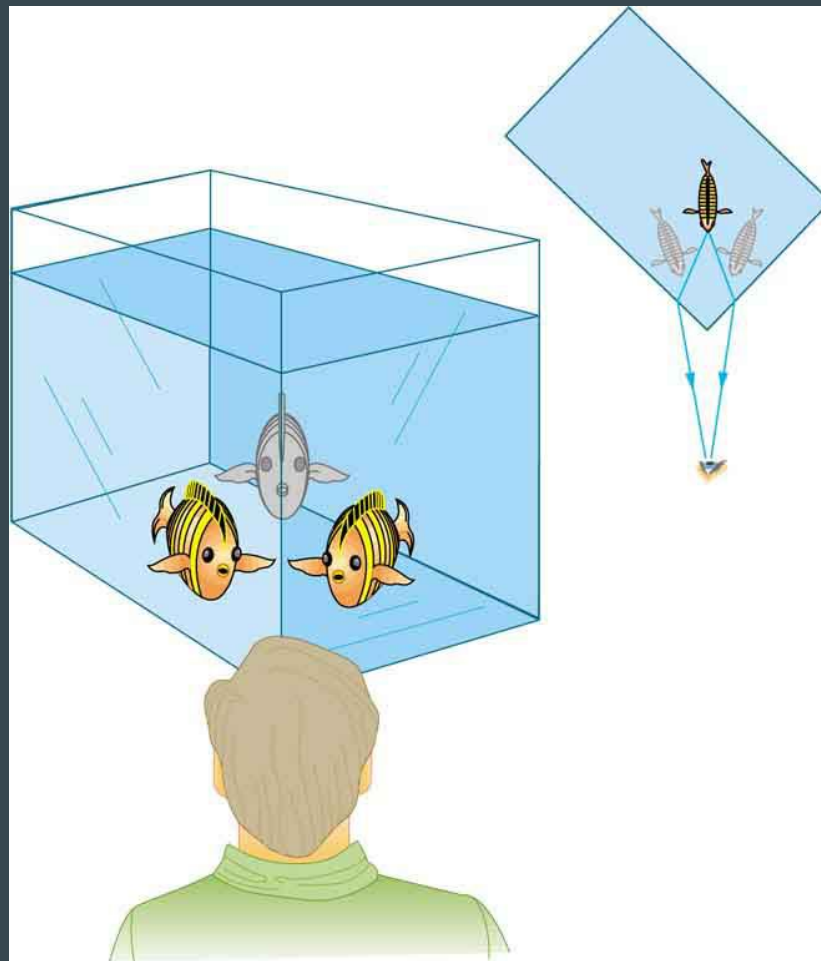
Analisar o caminho de luz pela atmosfera e o efeito da posição aparente de estrelas próximo do horizonte.



# Questão para discussão

Discute falhas (didáticas) no desenho ao lado.

Como determinar corretamente a posição das imagens do peixe?

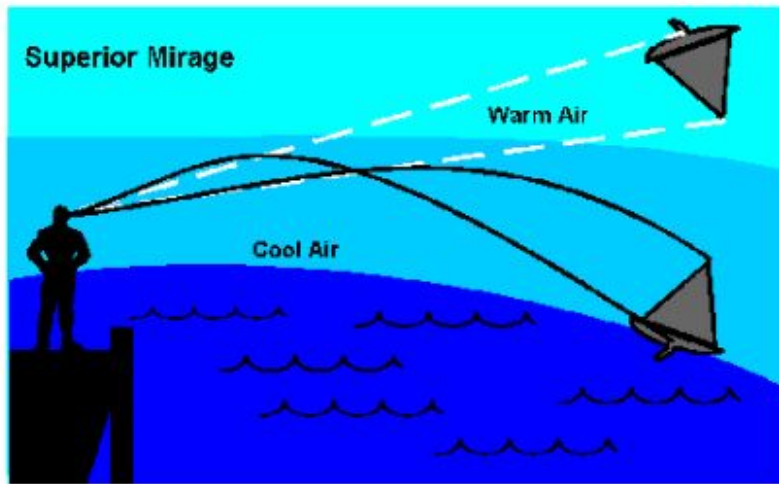


# MIRAGENS

Miragens acontecem quando os raios de luz que atingem nossos olhos atravessaram um meio não homogêneo (o ar) onde o índice de refração não é constante, devido normalmente à variações de temperatura



A miragem mais comum é a observada quando a temperatura do ar é mais elevada nas camadas mais próximas da superfície porém, em regiões muito frias, ou no mar, pode ocorrer o contrário, o ar nas camadas mais baixas é mais frio. Essas miragens assustaram muitos navegadores nos séculos passados.



<http://www.islandnet.com/~see/weather/elements/mirage1.htm>