

# Reflexão e Refração


- Frentes da onda
- Ondas esféricas
- Dispersão das moléculas cria ondas esféricas
- Ondas esféricas podem sobrepor e criar ondas planas
- Reflexão e refração das superfícies
  - Lei de Descartes-Snell
- Prismas e miragens




Referência Hecht : 4.3-4.4

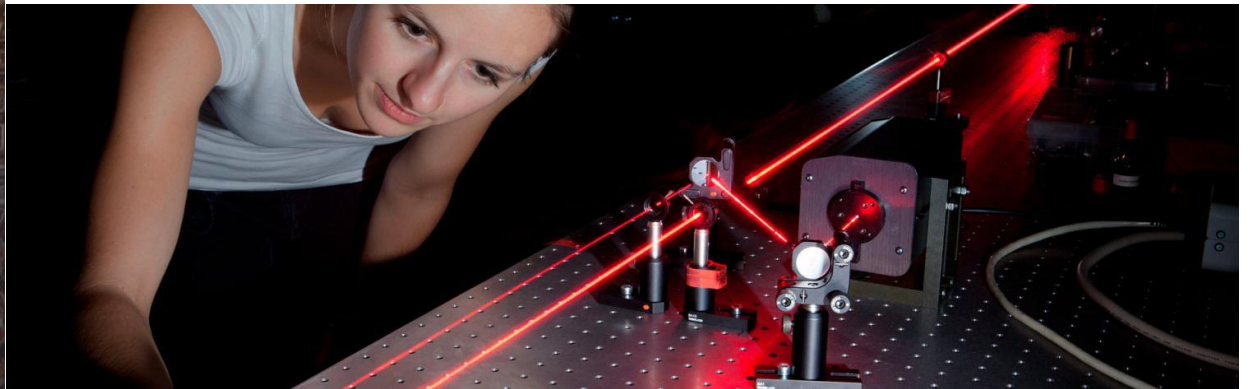
# feixes

Para ver um feixe a luz tem entrar diretamente no olho  
ou ser dispersada por partículas / moléculas

 This eye sees ~~no~~ light  
little



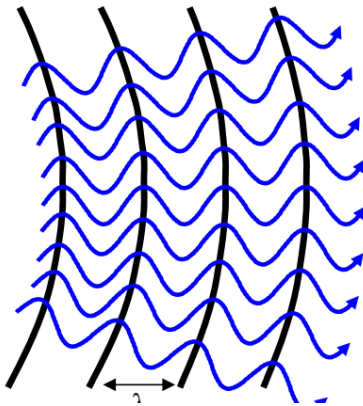
 This eye is blinded...



# Frentes de ondas

Difusão em frente é corrente  
mantêm as frentes de ondas

As frentes de ondas são as  
superfícies de fase constante

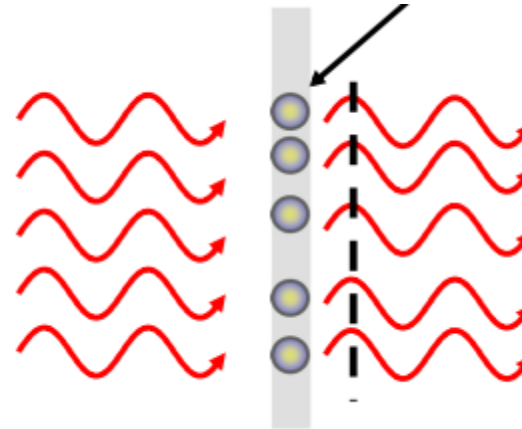


Frentes de onda são:

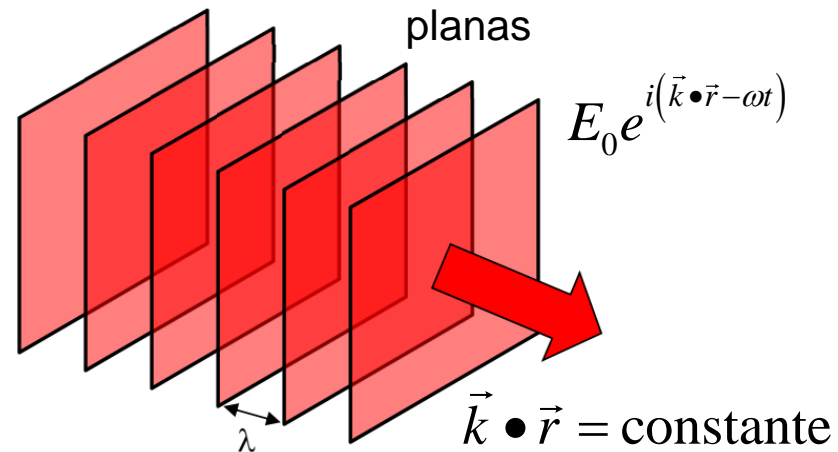
- perpendiculares a direção da propagação
- Propagam com a velocidade de fase no meio

Conjunto aleatório de elementos difusoras

Onda  
incidente



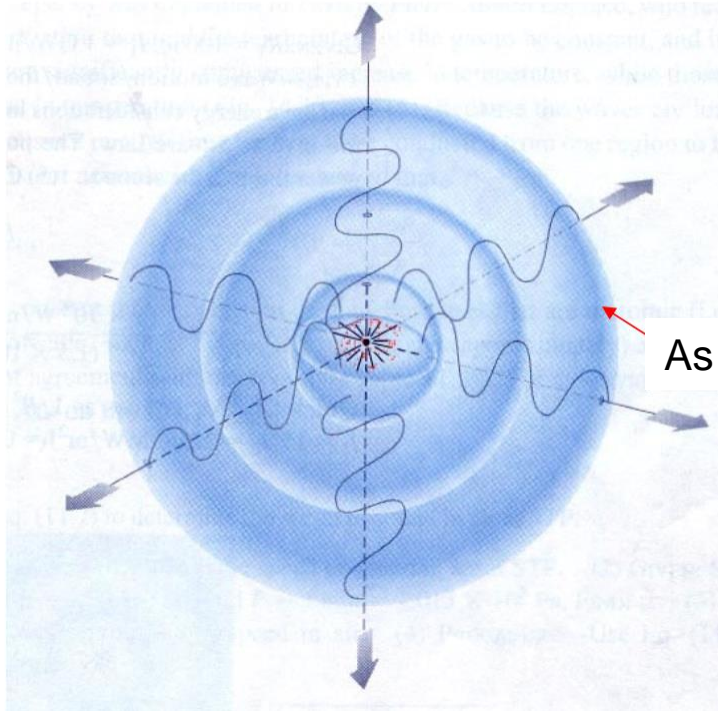
Ondas planas  
têm frentes de onda  
planas



# Ondas esféricas

---

Suficientemente longe dos átomos / moléculas a onda radiada é uma onda esférica



As superfícies de fase constante são esféricas



Isso não implica que a intensidade é igual em qualquer direção. A fase é igual na superfície da esfera mas a amplitude pode variar (e.g. padrão dipolar)

---

# Ondas esféricas

---

A equação da onda em coordenados esféricos

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \vec{E}}{\partial r} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 (r\vec{E})}{\partial r^2} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 (r\vec{E})}{\partial t^2}$$

Igual á equação de onda a propagar ao longo dos eixo dos zzs em coordenados cartesianos só que

$$z \rightarrow r \quad \vec{E} \rightarrow (r\vec{E})$$

Solução:  $\vec{E} = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \rightarrow \vec{E} = \frac{E_0}{r} e^{i(kr - \omega t)}$

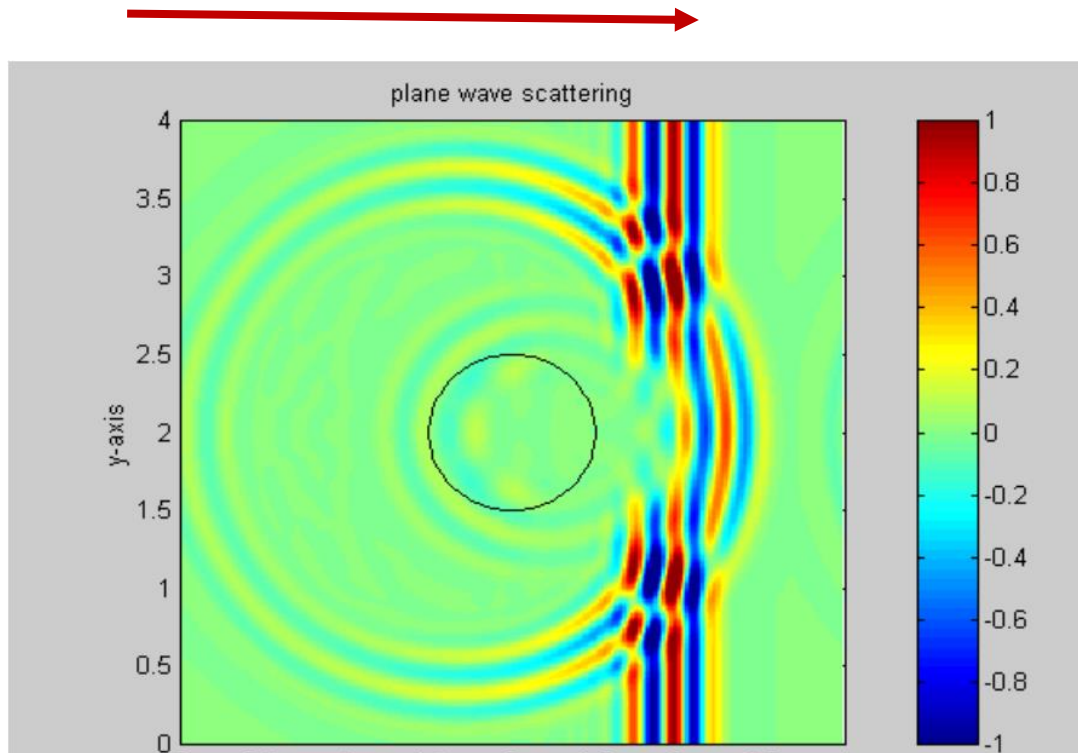
$$I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c \left| \vec{E} \right|^2 = \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_0 c \left| \vec{E}_0 \right|^2}{r^2}$$

**Irradiância duma fonte esférica cai como  $1/r^2$**   
(A mesma potência espalha sobre uma superfície cuja área aumenta com  $r^2$ )



# Difusão de ondas planas

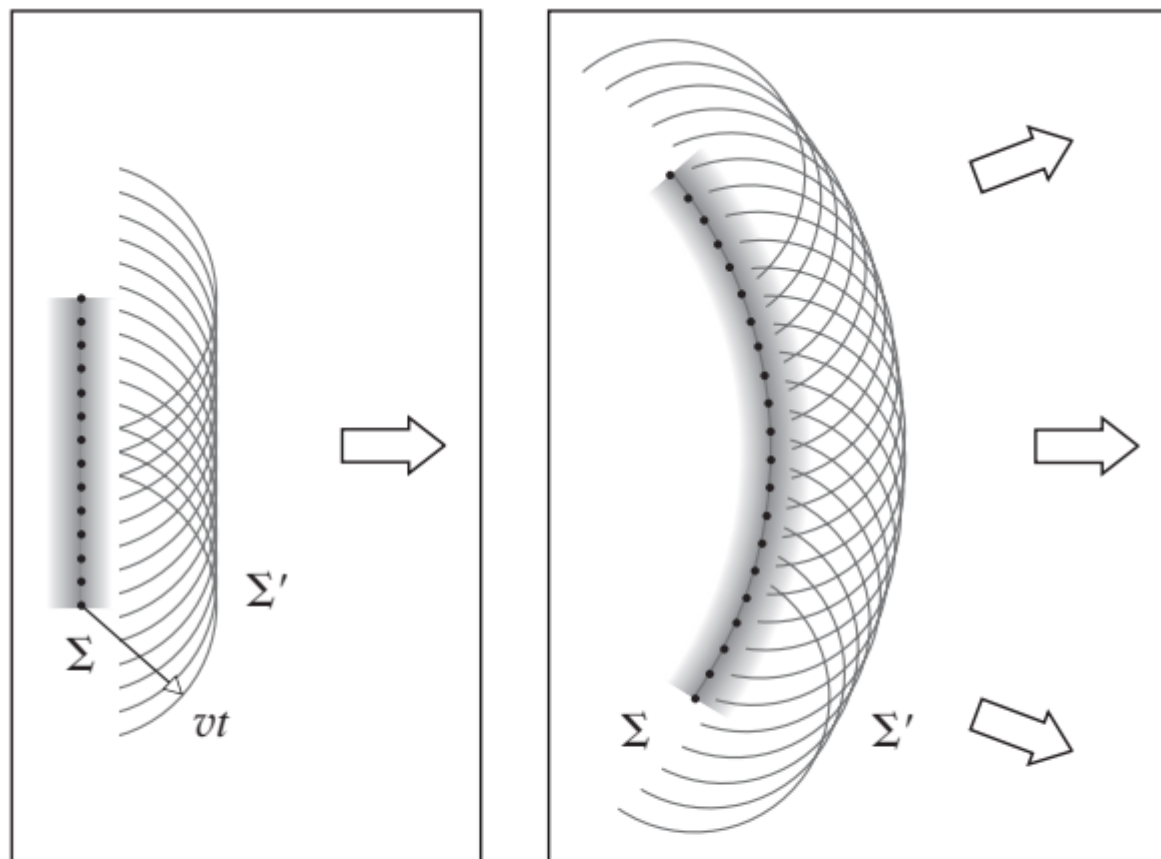
---



Uma onda plana incidente numa molécula ou uma partícula pequena é difundida em ondas esféricas. A potência radiada duma única molécula é fraca, mas se houver interferência construtiva entre várias difusoras a potência radiada pode chegar aos valores elevadas.

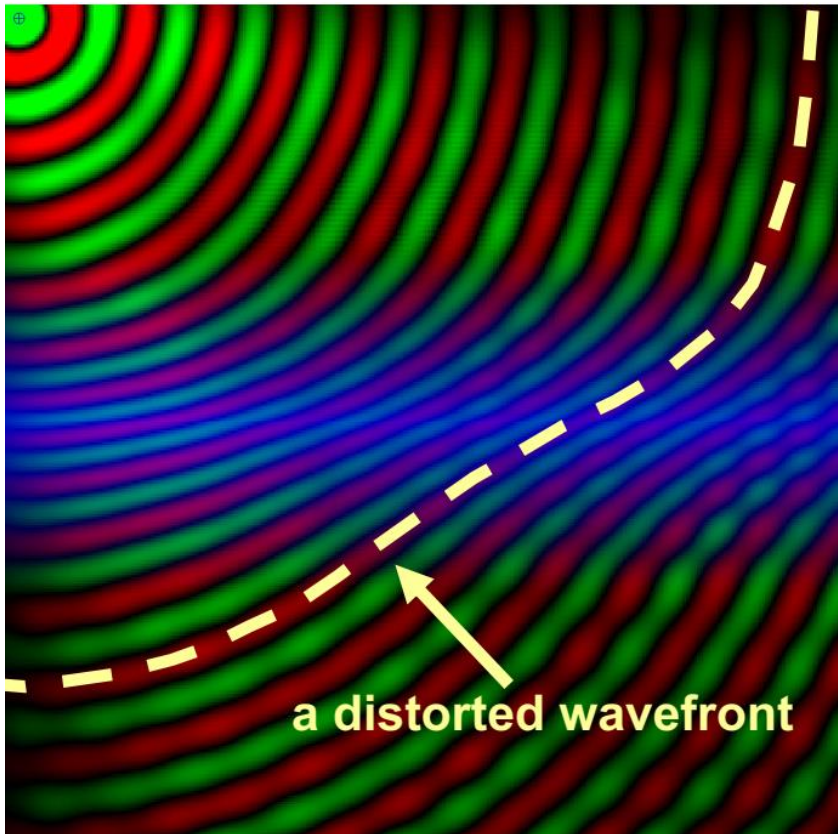
---

# Principio de Huygens

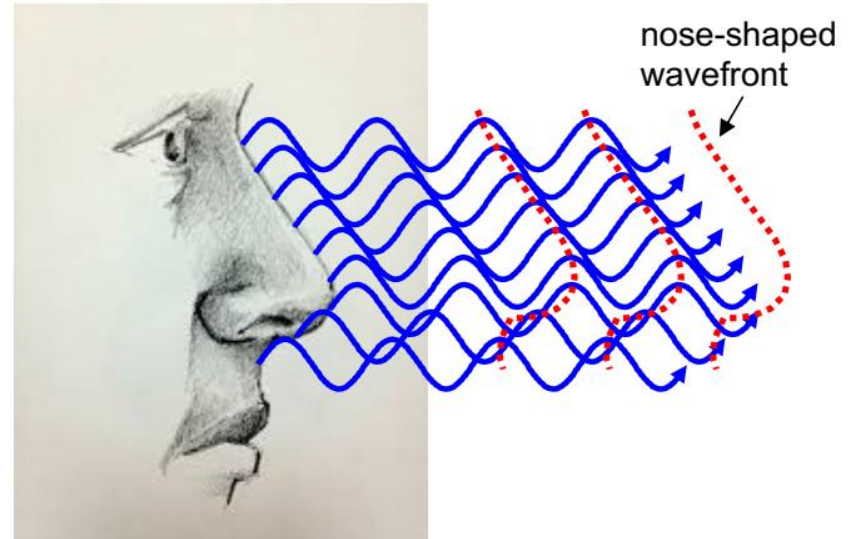


**Figure 4.32** According to Huygens's Principle, a wave propagates as if the wavefront were composed of an array of point sources, each emitting a spherical wave.

# Frentes de onda podem ser complicadas



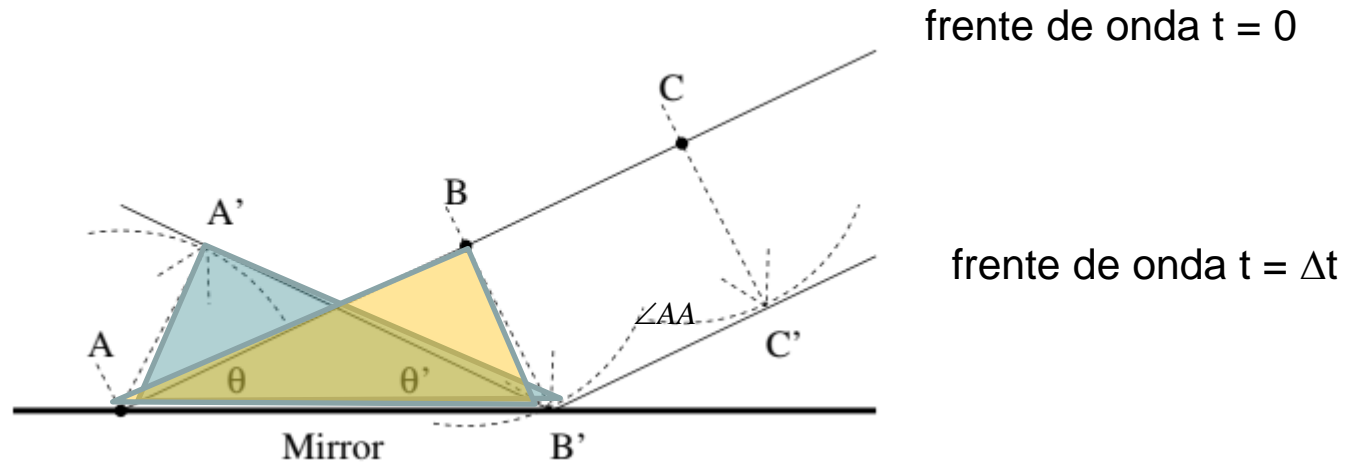
Zona azul tem menor índice de refração  
Distorça as frentes de onda



Em geral qualquer frente de onda pode ser  
“construída” através uma sobreposição de  
ondas planas ou ondas esféricas



# Reflexão numa superfície lisa



Durante o intervalo do tempo  $\Delta t$  A(B,C) emite ondas esférica que chegam a A'(B', C')

Considere os triângulos retos  $AA'B'$  e  $BB'A$

$$AA' = BB' = c\Delta t$$

$AB'$  é comum

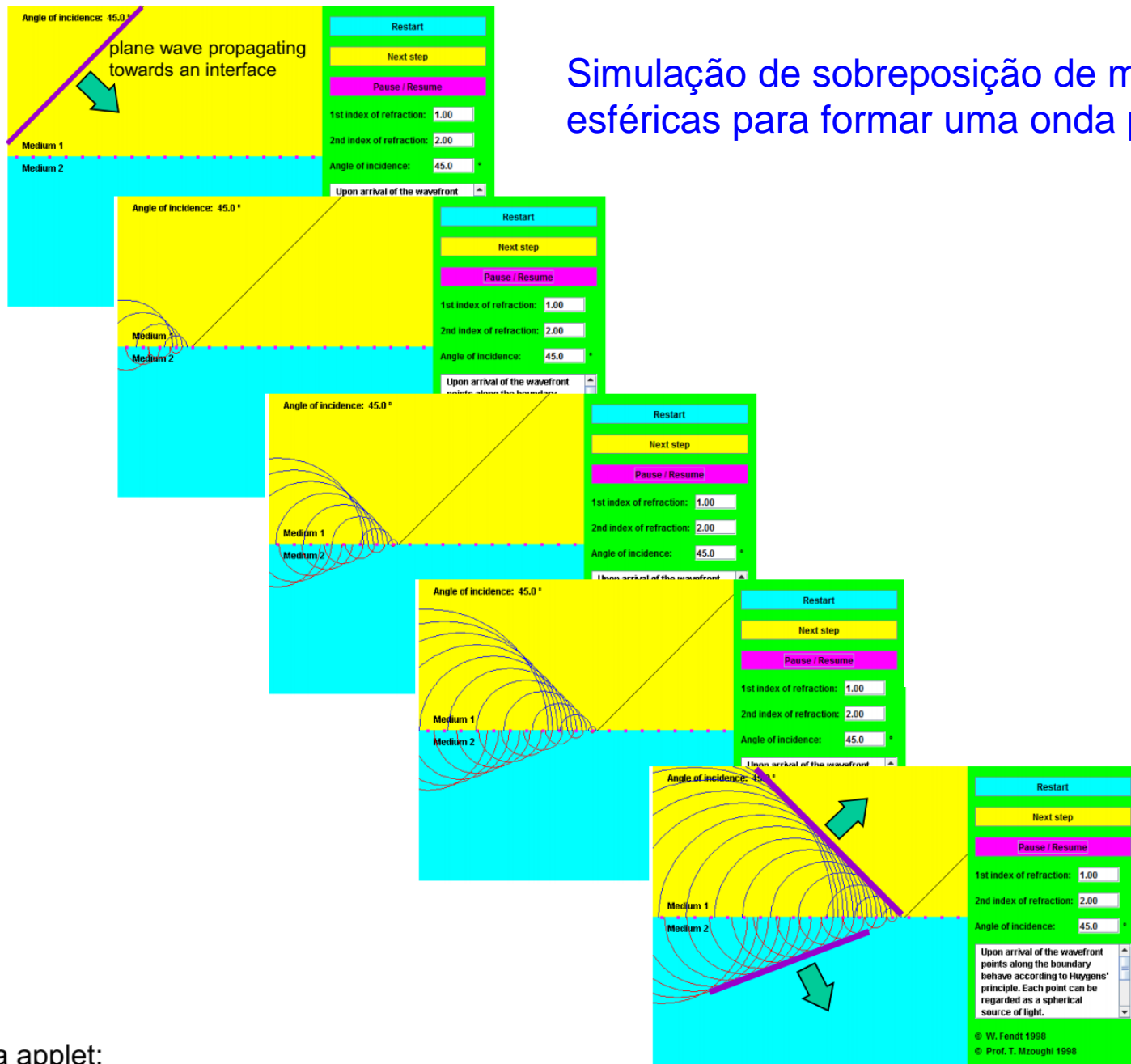
$$\angle AA'B' = \angle ABB' = \pi / 2$$

Os triângulos são equivalentes portanto

$$\theta = \theta'$$

**O ângulo de incidência = o ângulo de reflexão**

## Simulação de sobreposição de muitas ondas esféricas para formar uma onda plana refletida



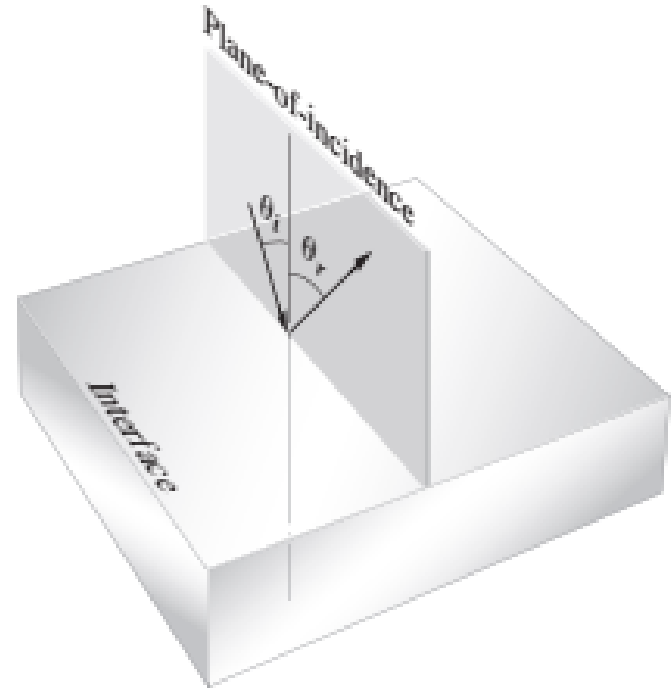
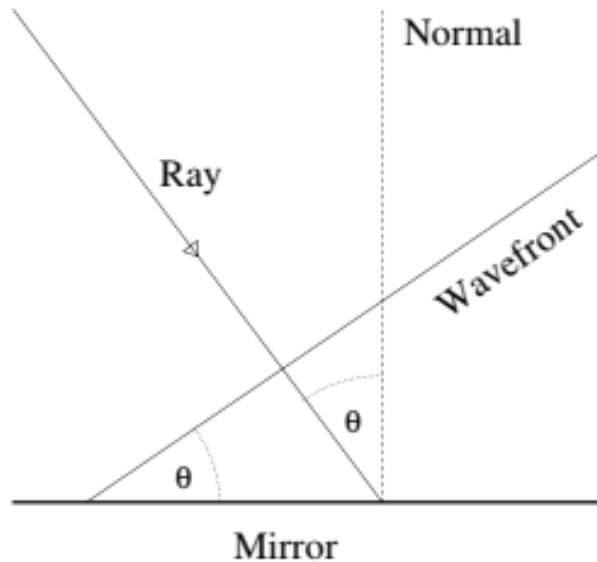
Java applet:

[http://www.walter-fendt.de/html5/phen/refractionhuygens\\_en.htm](http://www.walter-fendt.de/html5/phen/refractionhuygens_en.htm)

# Raios “geométricas”

---

Raios geométricas são perpendiculares às frentes de onda (apontam na direção da propagação)

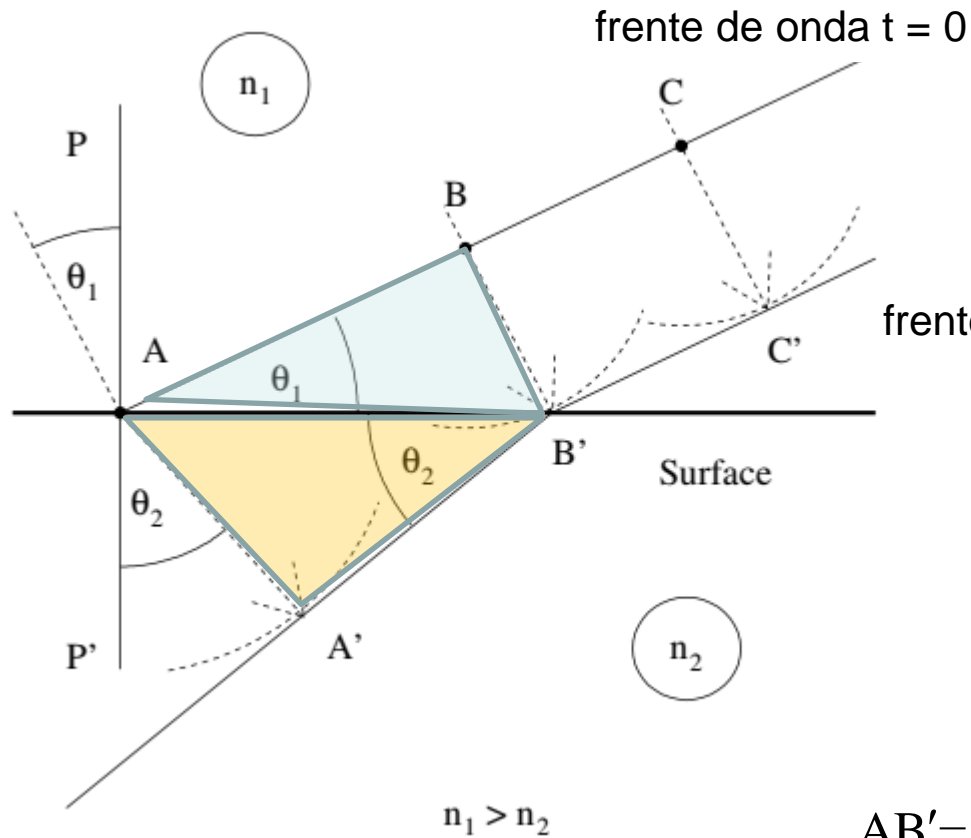


Em geral o **ângulo de incidência** é definida como o ângulo que o raio incidental faz com o normal ao superfície.

O **plano de incidência** é o plano que contém o raio incidente e o raio refletido

---

# Refração



Considere uma onda plano incidente numa interface entre dois materiais dielétricos

$$AA' = \frac{c\Delta t}{n_2} \quad BB' = \frac{c\Delta t}{n_1}$$

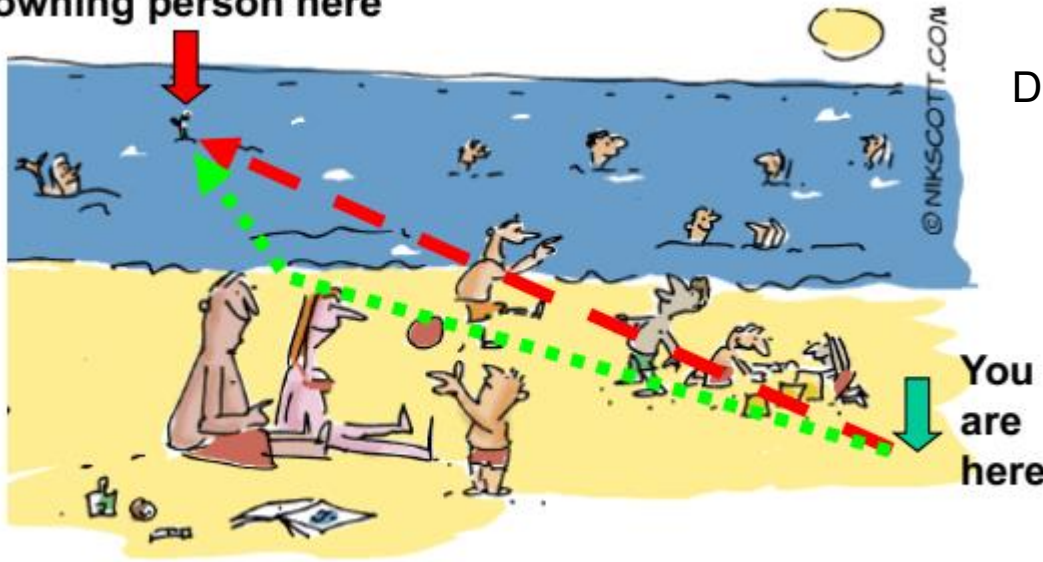
$$\frac{AA'}{AB'} = \sin \theta_2 \quad \frac{BB'}{AB'} = \sin \theta_1$$

$$AB' = A'B' \Rightarrow n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Lei de Snell-Descartes  
(deduzida pelo Ibn Sahl em 984)

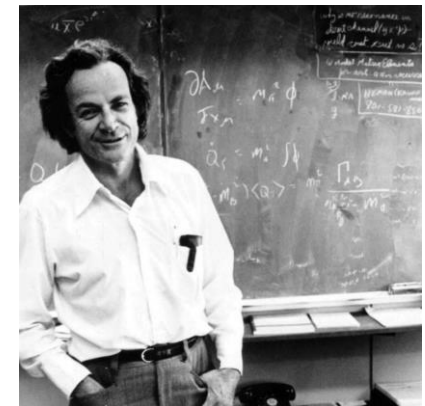
# Princípio de Fermat

Drowning person here



Distância menor  $\neq$  tempo menor

Fermat's Principle in its modern form reads: *a light ray in going from point  $S$  to point  $P$  must traverse an optical path length that is stationary with respect to variations of that path.*

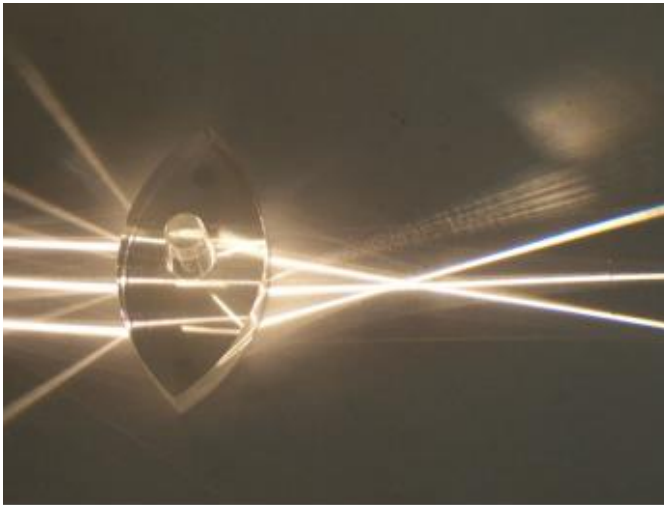
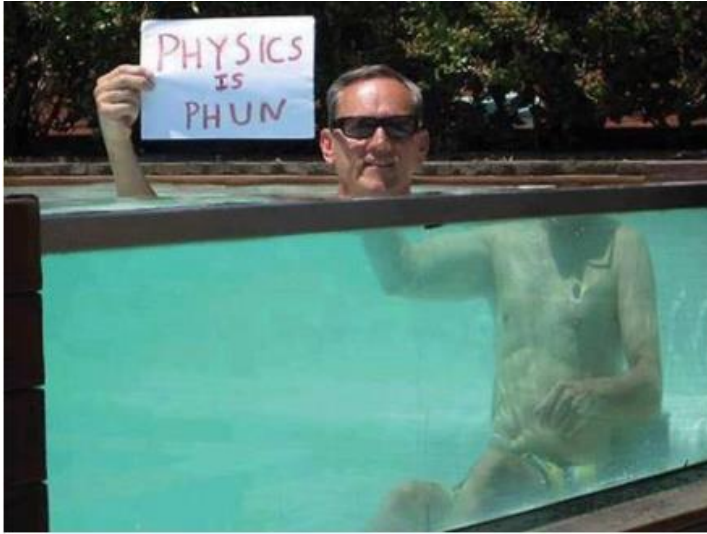


Feynman generalizou esta ideia na teoria dos caminhos quânticos

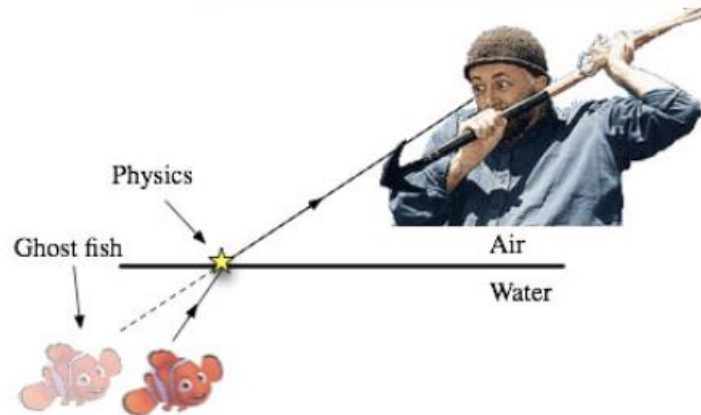
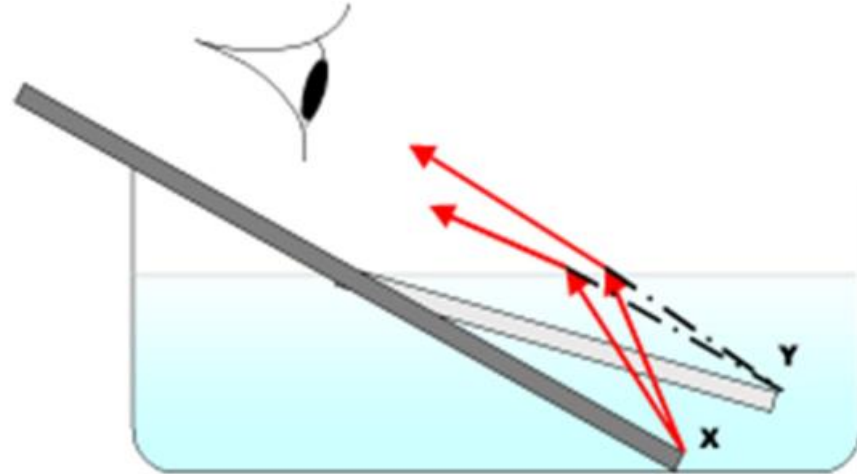


# Consequências de Lei de Snell-Descartes

---

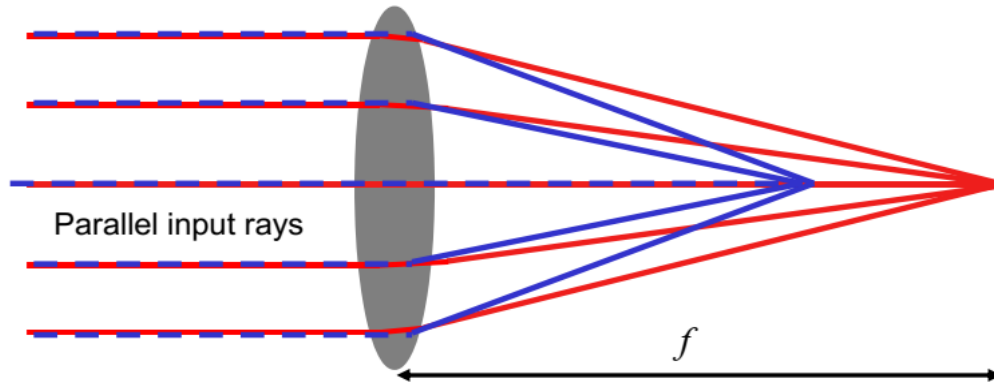


# Deslocação da imagem



# Lentes positivas focam luz

---



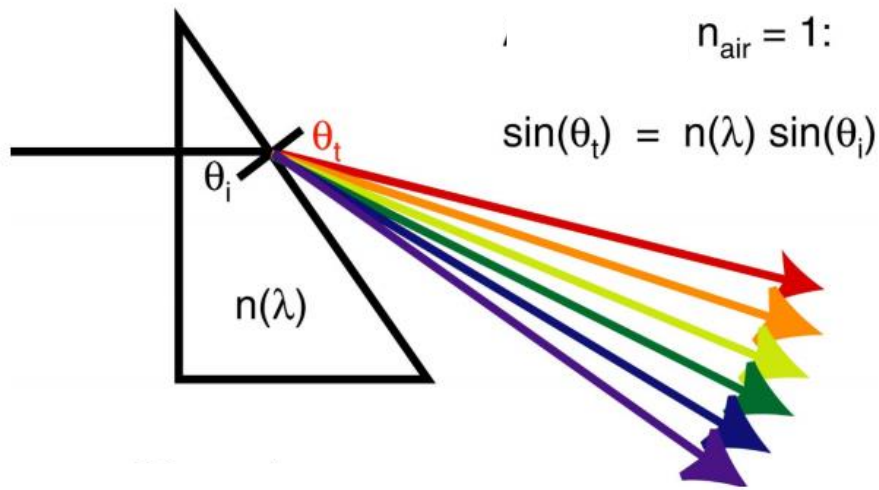
Se a forma da lente é apropriada todos os raios paralelos convergem num ponto (a distância focal,  $f$ , da lente)

Variação do índice de refração com  $\lambda$  pode fazer que cores diferentes focam em pontos diferentes (aberração cromática)...

---

# Prismas dispersam a luz

---



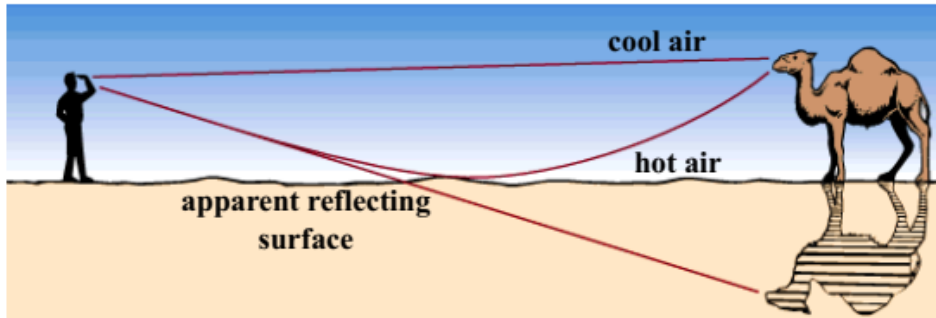
$$\cos(\theta_t) \frac{d\theta_t}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \sin(\theta_i)$$

$$\frac{d\theta_t}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{\sin(\theta_i)}{\cos(\theta_t)}$$

O desvio se varia com a dispersão do índice de refração  
(e o ângulo do ápex no caso de incidência normal na primeira interface)

# miragens

---



A reflexão é interpretada como uma superfície de água





# Efeitos atmosféricos

---



No por do Sol o Sol fica achatada

As estrelas cintilam devida  
flutuações na atmosfera

