

Física Geral I • FIS0703

Aula 09

24/10/2016

Ótica



A natureza da luz

O que é a luz?

- ▶ **Antiguidade e idade média:** luz é um fluxo de **partículas** que emanam dum objeto e chegam ao olho (ou que emanam do olho e chegam ao objeto!)
- ▶ **Isaac Newton (1642-1727):** luz é um fluxo de partículas. Com isso explicou a reflexão e a refração da luz.
- ▶ **Christian Huygens (1678):** luz é uma **onda**. Com isso explicou a reflexão, a refração e outras propriedades da luz.
- ▶ **Thomas Young (1801):** mostrou a interferência de duas feixes de luz.
- ▶ **James C. Maxwell (1865):** formulou a teoria do eletromagnetismo. Mostrou que as suas equações têm soluções em forma de ondas que se propagam com a velocidade da luz.
- ▶ **Heinrich Hertz (1888):** produziu **ondas eletromagnéticas** no laboratório (confirmação da teoria de Maxwell).

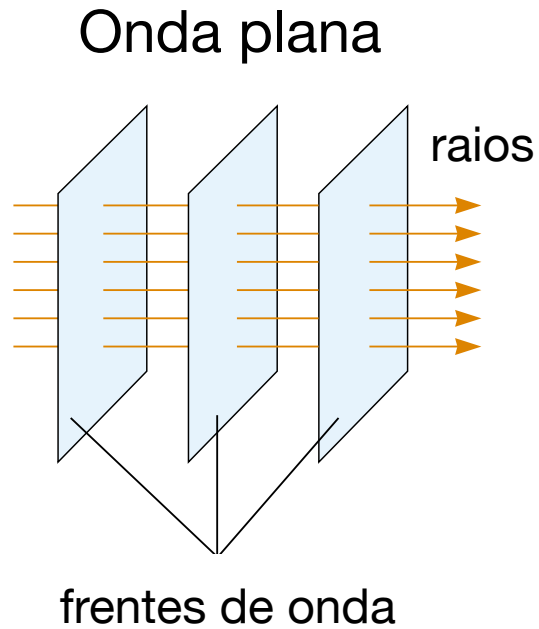
A velocidade da luz:

- ▶ **Ole Roemer (1675):** primeira medição de c através de observações astronómicas de luas do Júpiter. Mostrou pela primeira vez que a velocidade da luz é finita, e que $c \approx 2.3 \times 10^8$ m/s.
- ▶ **Armand H.L. Fizeau (1849):** mediu c com métodos terrestres. Obteve $c \approx 3.1 \times 10^8$ m/s.

Valor atual:

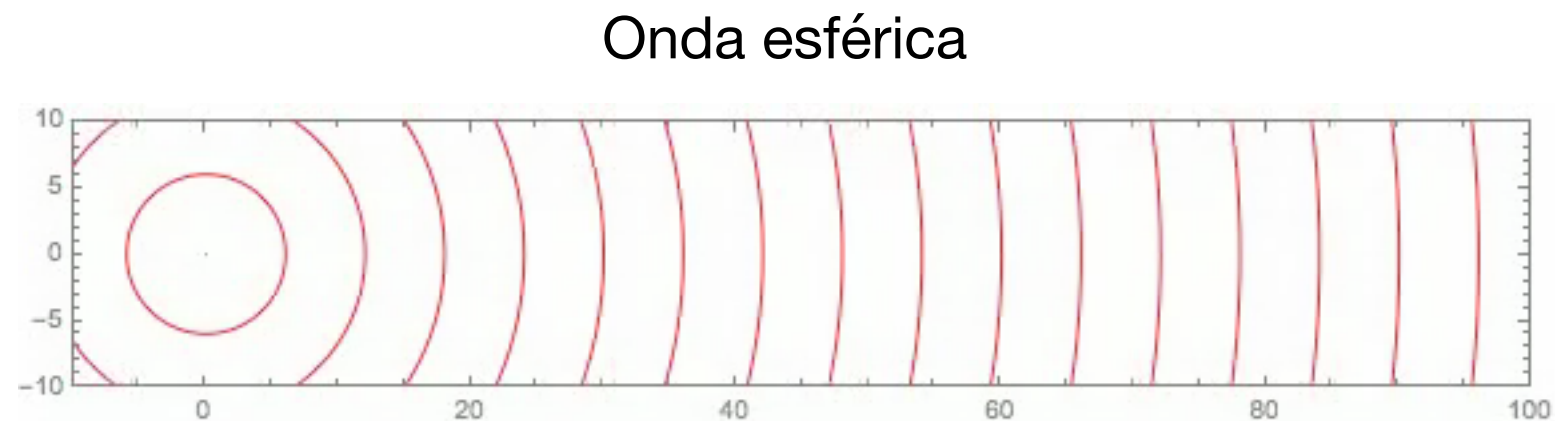
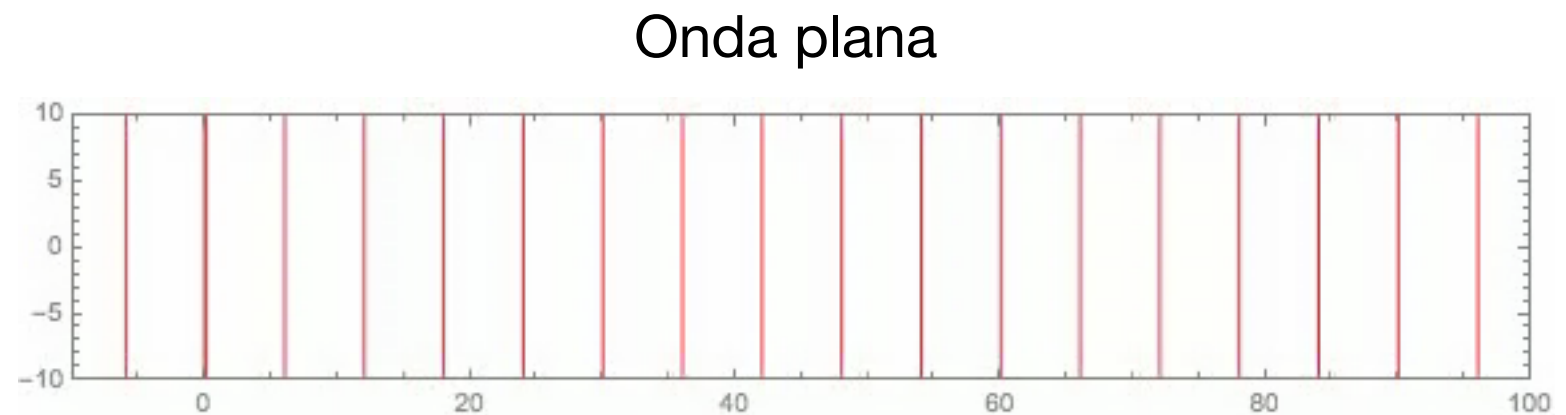
$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Ondas planas



Os raios são linhas retas perpendiculares às frentes de onda.

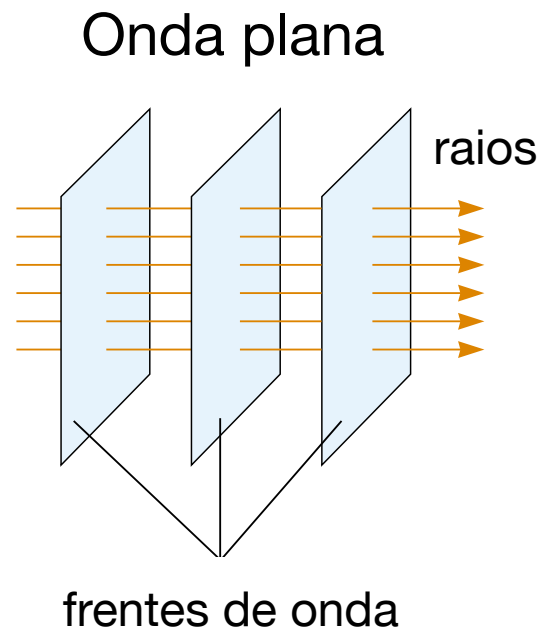
A onda move-se ao longo da direção dos raios.



As frentes de onda duma onda esférica aproximam-se **localmente** cada vez mais a planos enquanto os raios das frentes esféricas aumentam.

Ótica geométrica

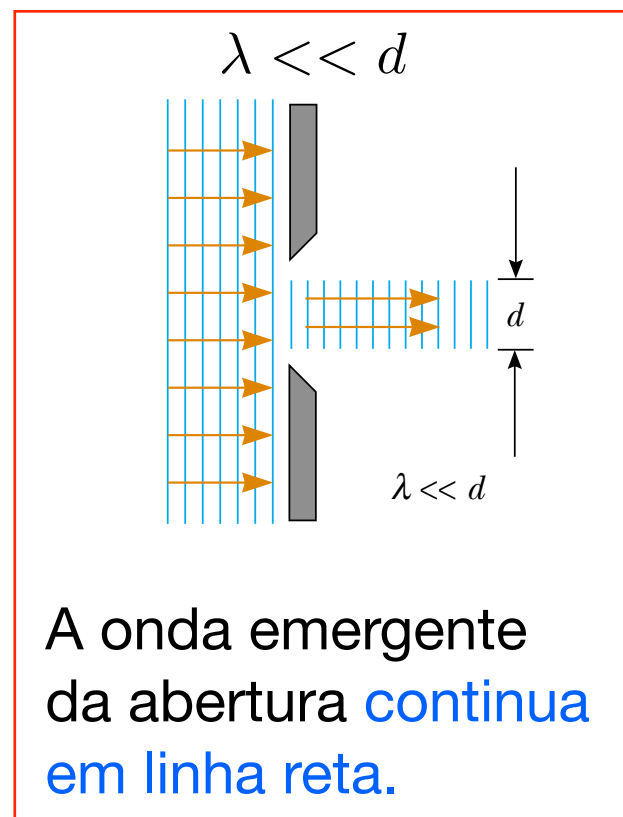
Pressuposto: num meio uniforme, a luz propaga-se numa dada direção em **linha reta**



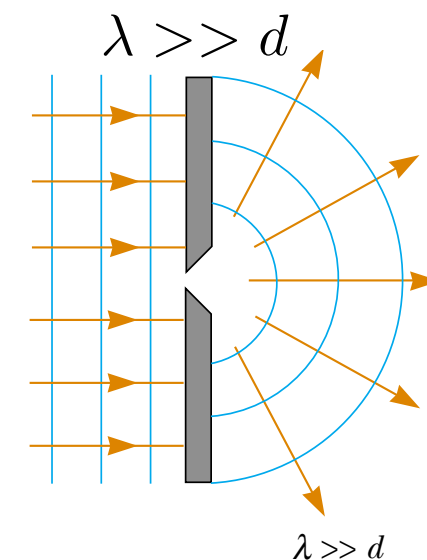
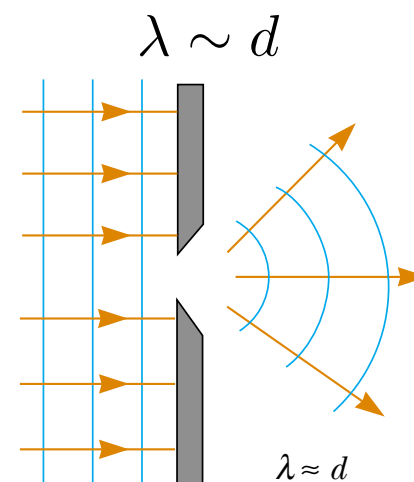
Os raios são linhas retas perpendiculares às frentes de onda.

A onda move-se ao longo da direção dos raios.

Consideremos uma onda que chega a uma **barreira** com uma pequena abertura circular (**diâmetro d**):



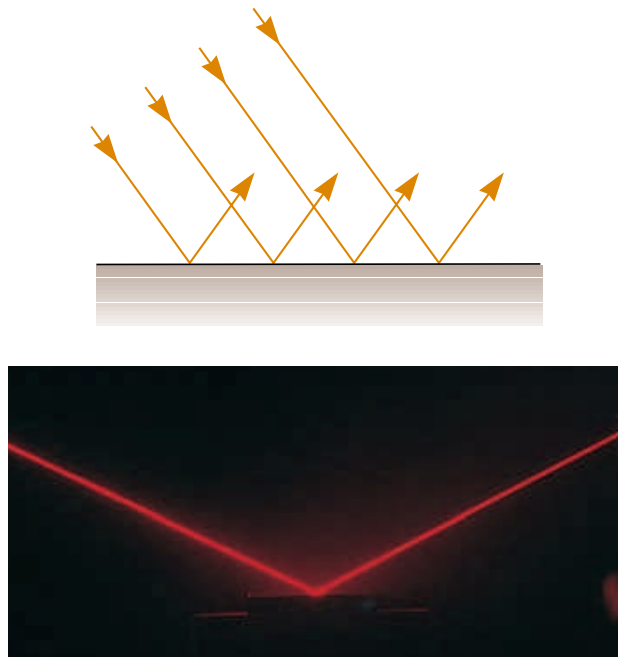
Regime da ótica geométrica



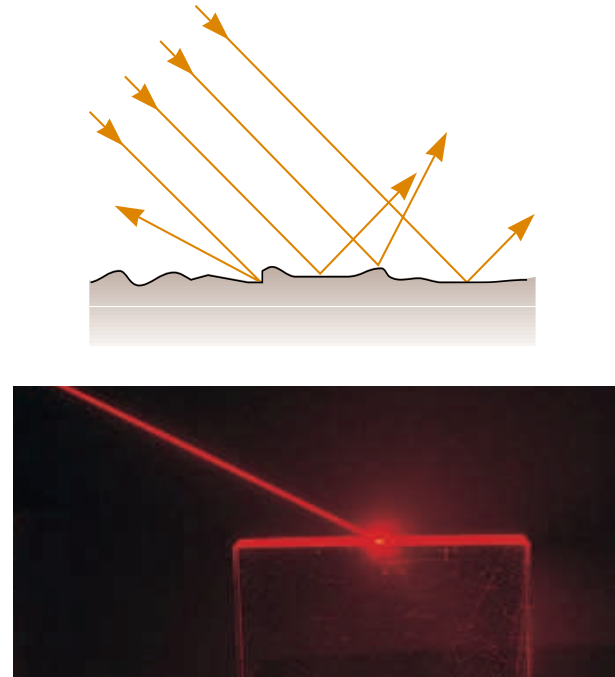
Reflexão

Quando luz encontra uma **fronteira** com outro meio, parte da luz é refletida.

Superfície lisa: **reflexão especular**



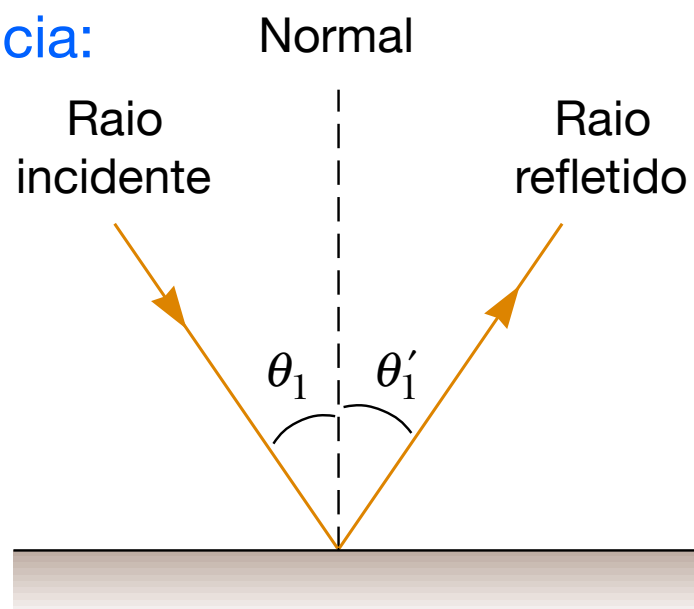
Superfície áspera: **reflexão difusa**



Superfícies com irregularidades a uma escala menor que λ comportam-se como superfícies lisas.

No seguinte, “reflexão” significará “reflexão especular”.

Experiência:



Ângulos são sempre medidos relativamente à normal às superfícies.

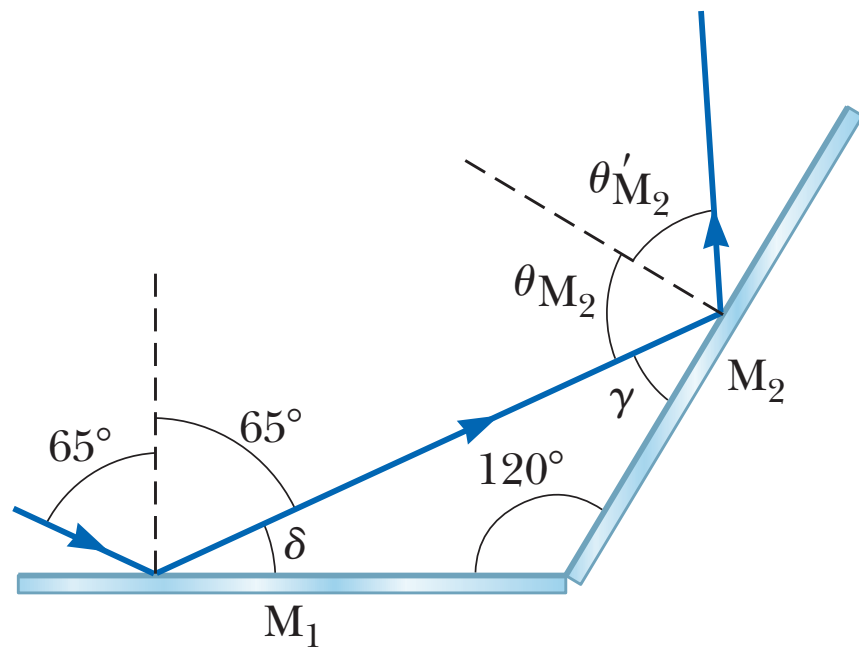
$$\theta'_1 = \theta_1$$

Lei da reflexão

O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência.

Exemplo: reflexão dupla

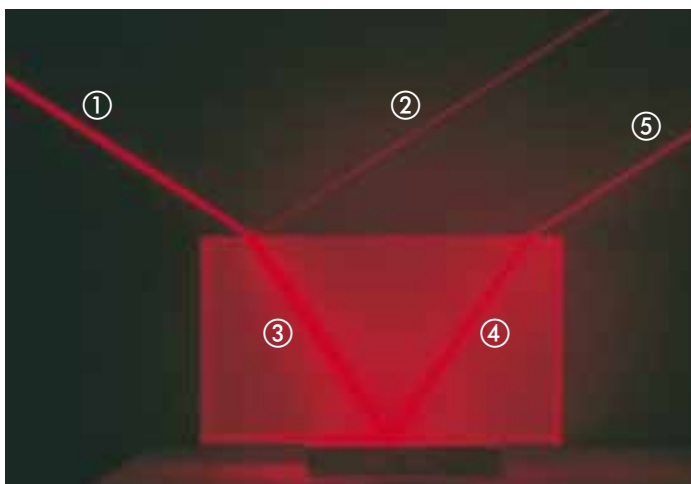
Dois espelhos fazem um ângulo de 120° entre si. Um raio incide num ângulo de 65° no espelho M_1 . Determine o ângulo de reflexão do raio do espelho M_2 .



$$\theta'_{M_2} = \theta_{M_2} = 90^\circ - \gamma = 90^\circ - (180^\circ - 120^\circ - \delta) = 30^\circ + \delta = 30^\circ + (90^\circ - 65^\circ) = 55^\circ$$

Refração

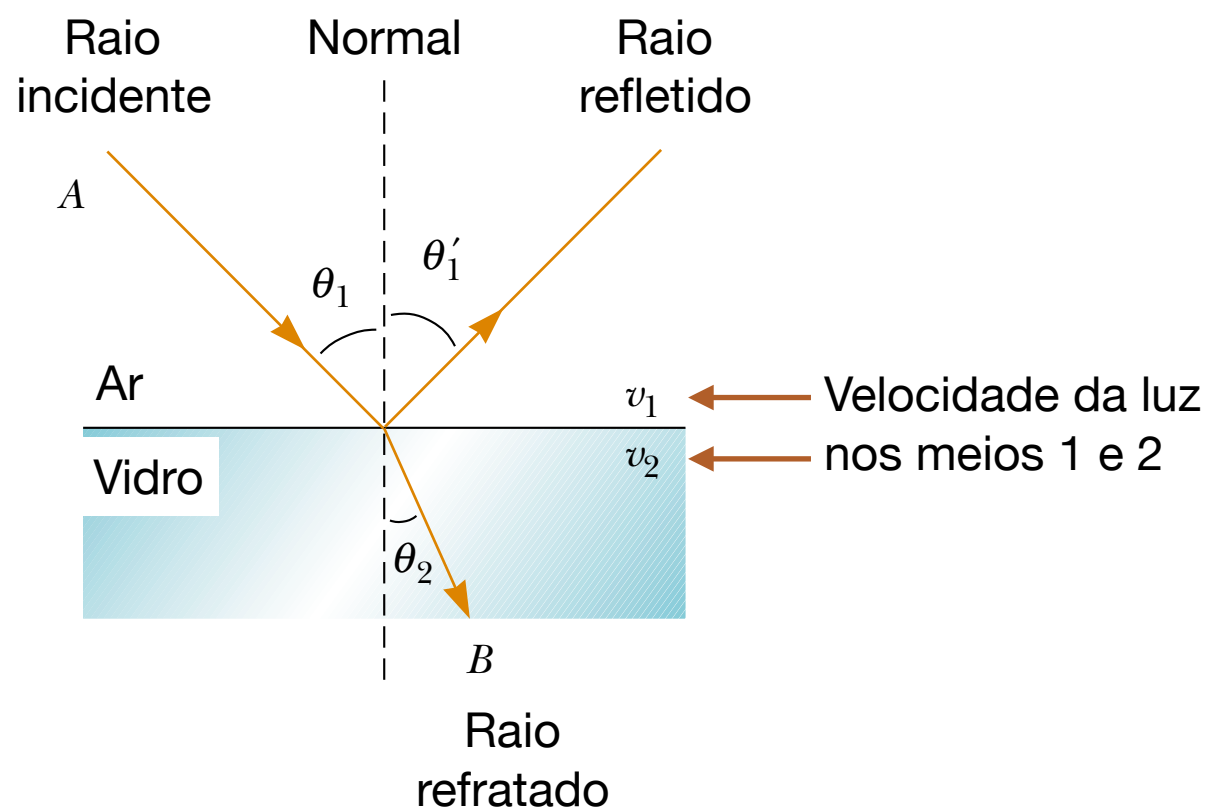
- ▶ Onda numa corda atinge junção com outra corda: reflexão parcial e transmissão parcial.
- ▶ Raios de luz num meio transparente encontram **fronteira** com outro meio transparente: **parte é refletido, outra parte transmitido** para outro meio, mas muda de direção — **refração**.



Os raios incidente, refletido e refratado estão no mesmo plano.

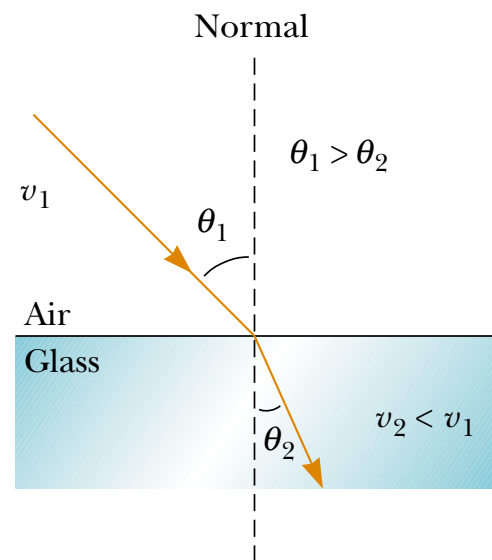
Observação: $\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$

Nota: o sentido do percurso dum raio de luz é **reversível**.

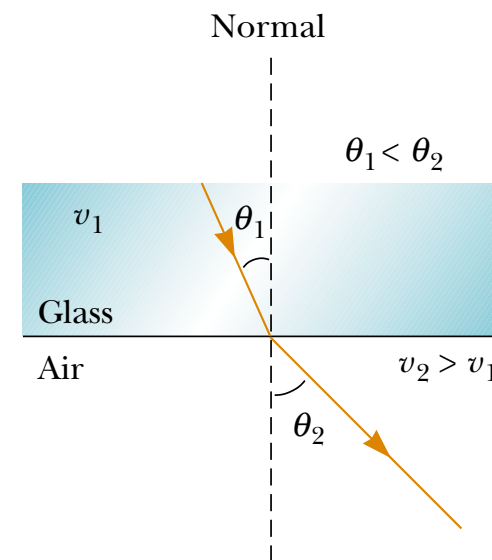


Transição ar-vidro

Ar → vidro

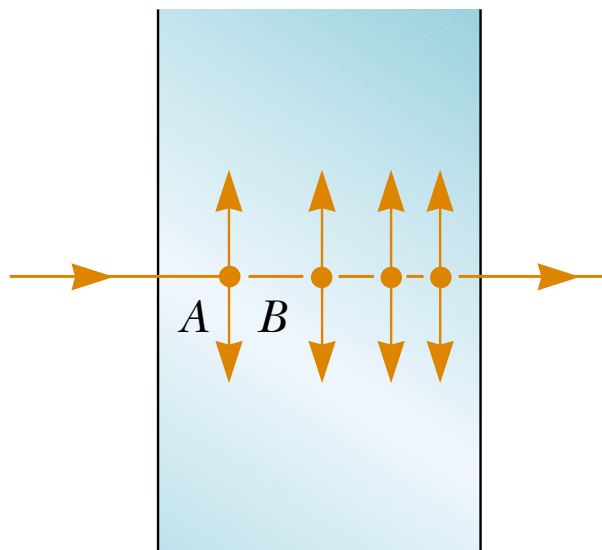


Vidro → ar



Em ar: $v \approx 3 \times 10^8$ m/s

Em vidro: $v \approx 2 \times 10^8$ m/s



A velocidade da luz em vidro é mais pequena:

- Um raio no meio é absorvido por um átomo (eletrão)
- O átomo (eletrão) oscila com a frequência da luz absorvida, re-emite o raio após algum tempo
- Entre os átomos, a luz move-se com velocidade c , mas a **velocidade média** é mais baixa

Uma explicação mais rigorosa é dada pela **mecânica quântica**.

O índice de refração

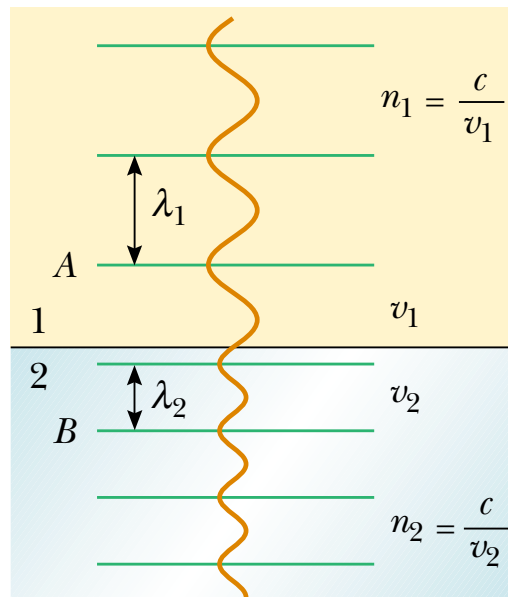
A velocidade da luz em qualquer meio é sempre menor do que a sua velocidade no vácuo, c .

Define-se

$$n \equiv \frac{c}{v} = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no meio}}$$

Índice de refração dum meio

$n > 1$ é um número (grandeza adimensional)



Quando luz passa de um meio para outro, a **frequência permanece inalterada**, mas o **comprimento de onda muda**.

A frequência com que as frentes de onda passam o ponto B tem de ser igual à frequência no ponto A (caso contrário energia teria de acumular-se ou desaparecer na fronteira — não há mecanismo para isso).

$$v_1 = f \lambda_1 \quad v_2 = f \lambda_2 \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2$$

$$\begin{array}{lcl} \text{c.d.o. no vácuo} & \lambda & \\ \text{c.d.o. no meio} & \lambda_n & \longrightarrow n = \frac{\lambda}{\lambda_n} \end{array}$$

Podemos re-escrever a lei da refração em termos dos índices de refração

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

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

Lei de Snell

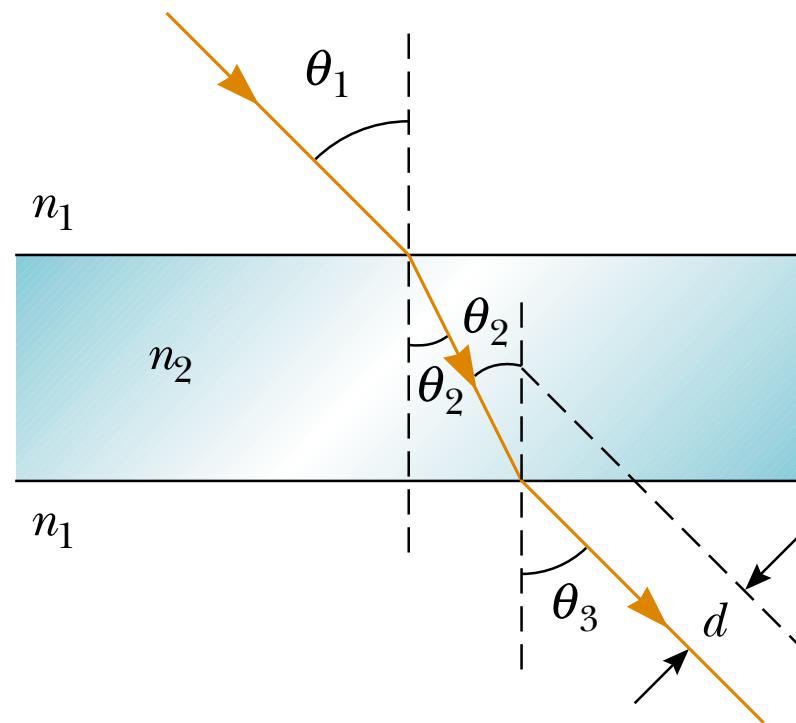
Índice de refração de vários meios

Substance	Index of Refraction	Substance	Index of Refraction
<i>Solids at 20°C</i>		<i>Liquids at 20°C</i>	
Cubic zirconia	2.20	Benzene	1.501
Diamond (C)	2.419	Carbon disulfide	1.628
Fluorite (CaF ₂)	1.434	Carbon tetrachloride	1.461
Fused quartz (SiO ₂)	1.458	Ethyl alcohol	1.361
Gallium phosphide	3.50	Glycerin	1.473
Glass, crown	1.52	Water	1.333
Glass, flint	1.66		
Ice (H ₂ O)	1.309	<i>Gases at 0°C, 1 atm</i>	
Polystyrene	1.49	Air	1.000 293
Sodium chloride (NaCl)	1.544	Carbon dioxide	1.000 45

Note: All values are for light having a wavelength of 589 nm in vacuum.

Exemplo: luz passa por uma placa

Um feixe de luz passa do meio 1 para o meio 2, sendo o último uma placa espessa dum material com índice de refração n_2 . Mostre que o feixe emergente é paralelo ao feixe incidente.



$$1 \rightarrow 2: \quad \text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1$$

$$2 \rightarrow 3 (=1): \quad \text{sen } \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \text{sen } \theta_2 = \frac{n_2}{n_1} \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1 = \text{sen } \theta_1$$

$$\longrightarrow \theta_3 = \theta_1$$

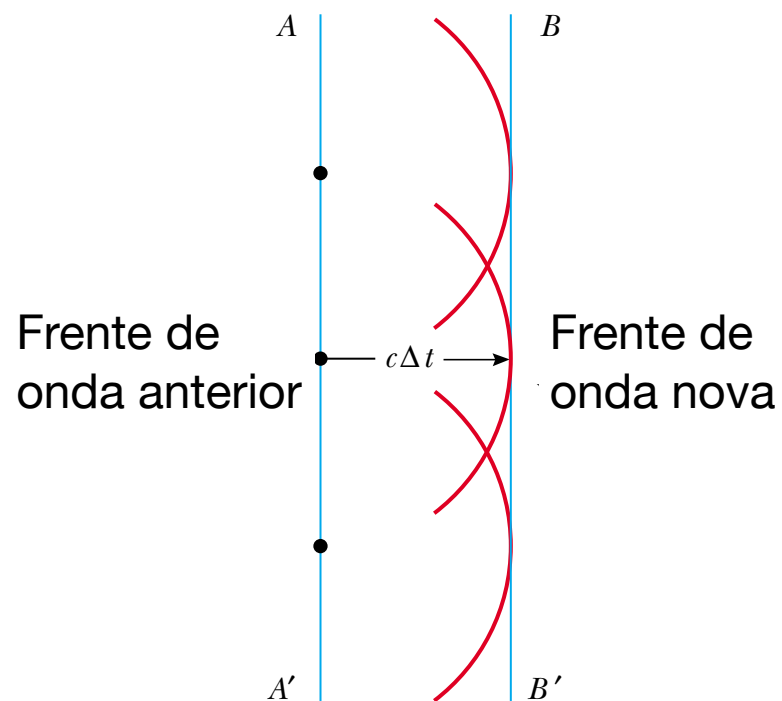
o feixe emergente é paralelo ao feixe incidente, mas é deslocado em d

O princípio de Huygens

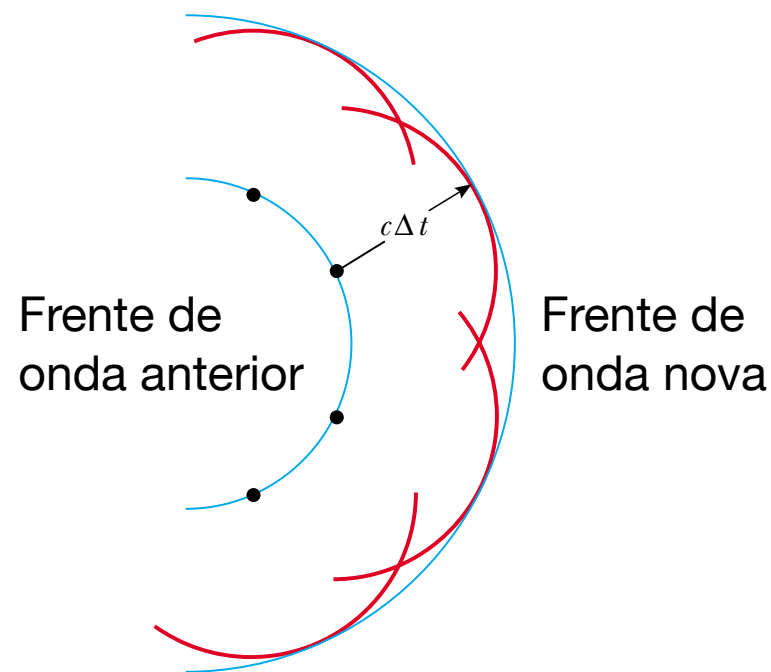
Huygens propôs em 1678 um método geométrico para determinar uma frente de onda num determinado instante a partir da posição da frente de onda no passado:

Cada ponto numa frente de onda é um centro emissor de novas ondas (esféricas).

Ondas planas



Ondas esféricas

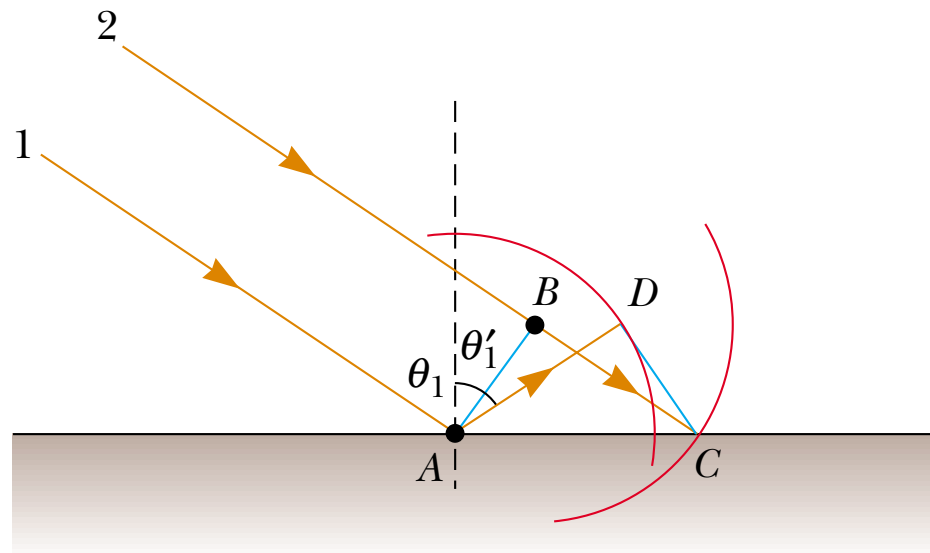


↑ “Wavelets” (ondazinhas)

A superfície tangente às *wavelets* é a nova frente de onda.

(Resultado de interferência construtiva ou destrutiva das *wavelets* em direções diferentes.)

A lei de reflexão pelo princípio de Huygens



- No instante em que raio 1 atinge a superfície, ele envia uma wavelet do ponto A e raio 2 envia uma wavelet do ponto B.
- Escolhemos um raio das wavelets $c\Delta t$, onde Δt é o intervalo de tempo para o raio 2 passar de B para C.

$$AD = BC = c\Delta t$$

Os triângulos ABC e ADC são congruentes.

$$\cos \gamma = \frac{BC}{AC}$$

$$\cos \gamma' = \frac{AD}{AC}$$

$$AD = BC$$

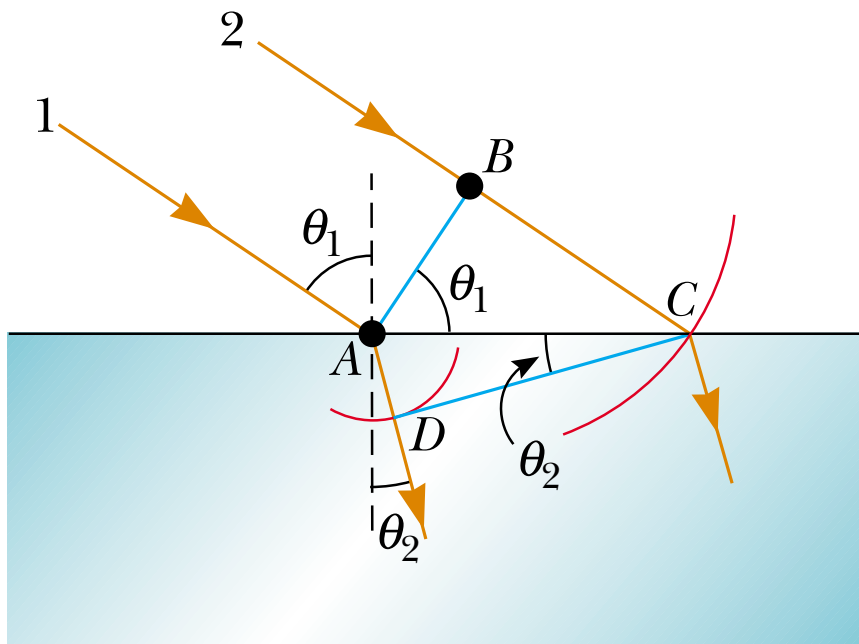
$$\cos \gamma = \cos \gamma'$$

$$\gamma = \gamma'$$

$$90^\circ - \theta_1 = 90^\circ - \theta'_1$$

$$\boxed{\theta_1 = \theta'_1}$$

A lei de refração pelo princípio de Huygens



- ▶ No instante em que o raio 1 atinge a superfície, ele envia uma *wavelet* do ponto A, e o raio 2 envia uma *wavelet* do ponto B.
- ▶ As duas ondas esféricas têm raios diferentes porque se propagam em meios diferentes.

$$AD = v_2 \Delta t$$

$$BC = v_1 \Delta t$$

Triângulo ABC: $\text{sen } \theta_1 = \frac{BC}{AC} = \frac{v_1 \Delta t}{AC}$

Triângulo ACD: $\text{sen } \theta_2 = \frac{AD}{AC} = \frac{v_2 \Delta t}{AC}$

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

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