

Cap. IV - A PROPAGAÇÃO DA LUZ (4.1)

Vamos agora começar a estudar a forma como a luz se propaga, atravessando ou sendo reflectida em diversos meios. Neste estudo vamos pensar "em grande", considerando as ondas e.m. a propagarem-se em meios caracterizados pelas propriedades do meio, e não considerar o que se passa a nível atómico.

Para começar vamos pensar em como é que uma frente de onda [superfície sobre a qual a fase da perturbação é constante] é afectada ao passar por um dióptro [uma superfície de separação entre dois meios].

A questão é como determinar Σ' , conhecendo Σ e a forma da peça de vidro?

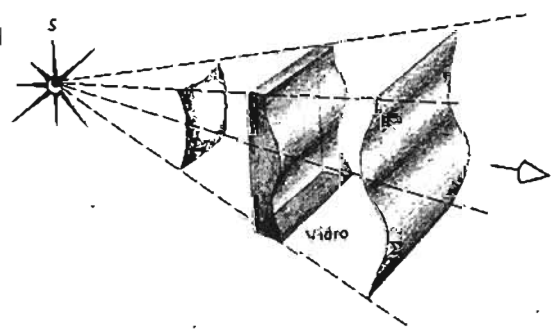


Figura 4.2 Distorção de parte de uma frente de onda ao passar através de um objecto com espessura não uniforme.

A primeira ideia foi dada por Huygen (1690) que estipulou ~~no~~ o seguinte:

PRINCÍPIO DE HUYGENS

(2)

Cada ponto de uma frente de onda primária constitui uma fonte para ondas esféricas secundárias, e a posição da frente de onda primária num instante posterior é determinada pela envolvente de todas essas ondas secundárias, que se propagam com velocidade e frequência igual à da onda primária.

E.H.43

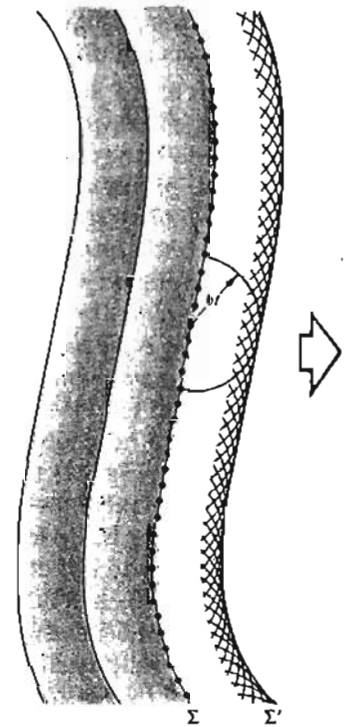


Figura 4.3 Explicação da propagação de uma frente de onda com base no princípio de Huygens.

A figura ao lado representa esse a aplicação desse princípio a uma frente de onda,

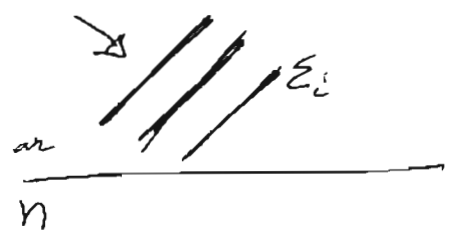
Este princípio tem uma falha fundamental: é que segundo a física o enunciado teórico de uma ~~uma~~ frente de onda de "retorno"

com um direções oposta à direção de propagação. Essa onda não existe, logo o princípio de Huygens não é perfeito mas é uma boa aproximação, de mesmo que as hemisférios no sentido de propagação.

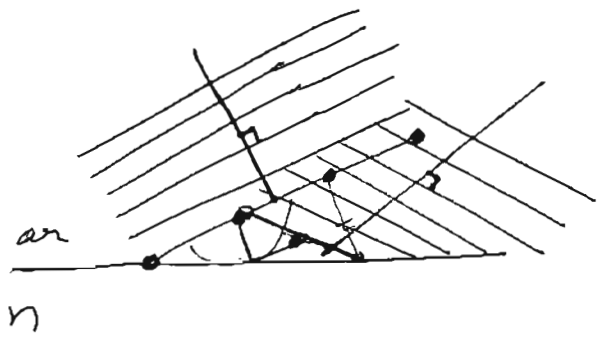
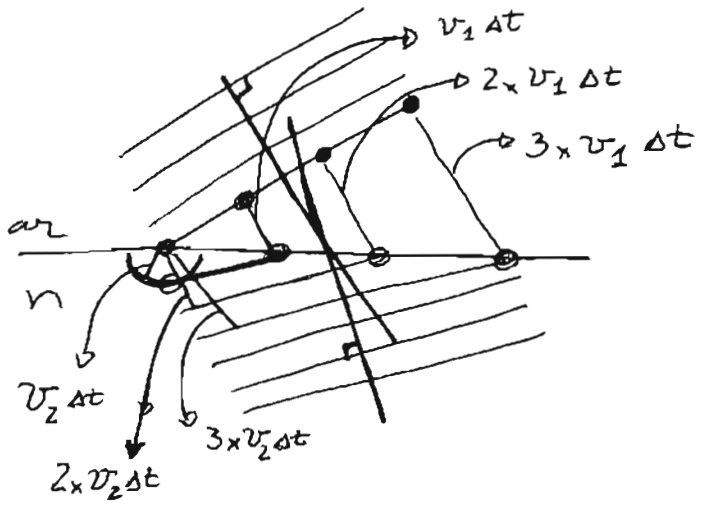
- lei de Snell, com base no princípio de Huygens

Daqui a pouco iremos fazer um tratamento rigoroso, mas para já vamos fazer um tratamento com base no princípio de Huygens.

Imaginemos uma onda plana E_i que incide, segundo um ângulo, num meio de índice de refração n .



Como já devem saber, essa frente de onda vai dar origem a duas outras, uma reflectida E_r e outra transmitida E_t (ou refractada). A reflectida vai-se propagar com uma velocidade $v_1 = n \frac{c}{n} = c$, e a refractada vai-se propagar com uma velocidade $v_2 = \frac{c}{n}$. ($n > 1 \Rightarrow v < c$)



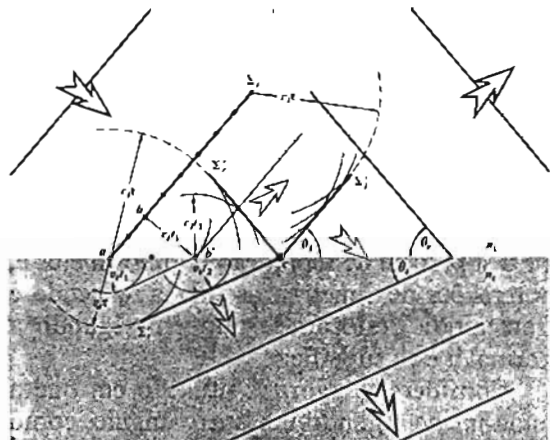


Figura 4.6 Explicação da reflexão e transmissão num dióptro com base no princípio de Huygens.

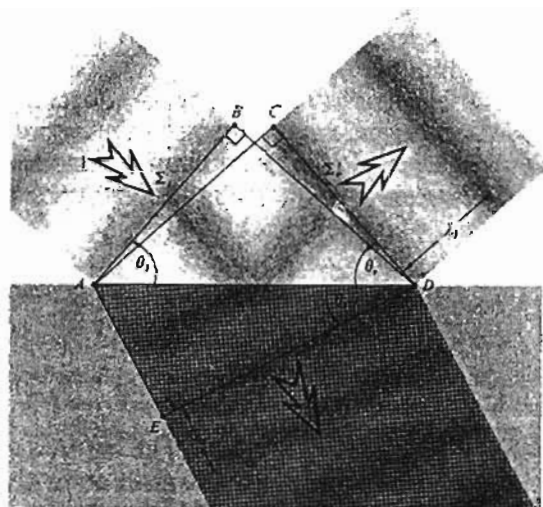


Figura 4.7 Frentes de onda reflectida e transmitida num dado instante.

Ao figura se ána representa a propagação, usando factores puramente "geométricos" (a distância percorrida é $v \cdot \Delta t$, considerando v_1 ou v_2 constante o meio).

Olhando para a da direita, podemos escrever:

$$\text{Sen } \theta_i = \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}} \qquad \text{Sen } \theta_r = \frac{\overline{AC}}{\overline{AD}}$$

$$\text{Sen } \theta_t = \frac{\overline{AE}}{\overline{AD}}$$

sendo \overline{AD} a evidência:

$$\frac{1}{\overline{AD}} = \frac{\text{Sen } \theta_i}{\overline{BD}} = \frac{\text{Sen } \theta_r}{\overline{AC}} = \frac{\text{Sen } \theta_t}{\overline{AE}}$$

$$\text{sendo } \overline{BD} = v_1 \cdot \Delta t \qquad \overline{AC} = v_1 \cdot \Delta t \qquad \overline{AE} = v_2 \cdot \Delta t$$

temos então

$$\frac{\text{Sen } \theta_i}{v_1} = \frac{\text{Sen } \theta_r}{v_1} = \frac{\text{Sen } \theta_t}{v_2}$$

$$\theta_i = \theta_r$$

$$\frac{1}{v_1} \text{Sen } \theta_r = \frac{1}{v_2} \text{Sen } \theta_t$$

O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

$$\frac{c}{v_1} \text{Sen } \theta_r = \frac{c}{v_2} \text{Sen } \theta_t$$

$$n_1 \text{Sen } \theta_i = n_2 \text{Sen } \theta_t$$

Lei da Reflexão

Lei da Refração

Lei de Snell-Descartes

Notar nas figuras da página anterior que as frentes de onda são contínuas na fronteira entre os meios. Esta condição resulta do e.m., e é outro caminho de deduzir a lei de Snell.

- Raios luminosos

É muitas vezes útil recorrer ao conceito de raios para descrever a propagação da luz. Estes raios (ou feixes) são linhas com a direção de propagação do fluxo de energia da radiação.

(hoje em dia, eles são fáceis de visualizar, graças aos feixes laser).

Em meios isotrópicos (sem direções preferências) os raios de luz são ortogonais às frentes de onda! Logo são, nesse meio, paralelos a \vec{k} .

De notar que em meios isotrópicos e homogêneos, estes raios são linhas retas. A luz não faz curvas a partir do nada!

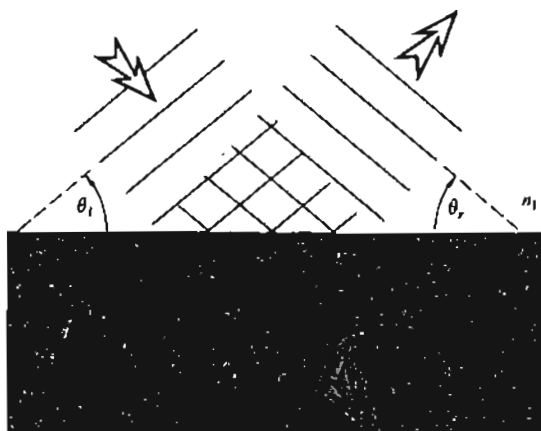
Um conjunto de raios que é perpendicular a uma superfície constitui uma congruência normal.

O Teorema de Malus e Dupin estipula que: (7)

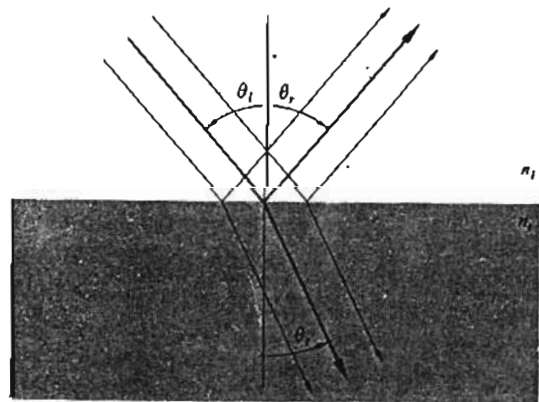
Uma congruência normal permanece normal após um número arbitrário de reflexões e refrações; (para meios isotrópicos).

Ou seja: Os raios são sempre perpendiculares às frentes de onda, ao longo da propagação!

Isso permite "rescrever" a lei de Snell, não para frentes de onda, mas raios:



Representação ondulatória



Representação de raios luminosos

Figura 4.10 Representação dos feixes incidente, reflectido e transmitido na linguagem das frentes de onda e dos raios luminosos.

Note que os ângulos são medidos e relatados
à normal à superfície. Se pre!

8
O raio incidente e a normal à superfície
definem o plano de incidência.

Naturalmente os raios refletido e refratado (transmitido)
também se encontram nesse plano. Isto equivale a dizer
que \vec{k}_i , \vec{k}_r e \vec{k}_t são co-planares.

Em resumo:

- ① os raios incidentes, refletido e refratado pertencem
todos ao plano de incidência
- ② $\theta_i = \theta_r$
- ③ $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

Depois resulta que raios que penetram em meios mais
densos (com maior índice de refração) refractam-se e
aproximam-se da normal, e vice-versa.

E qdo $\theta_i = 0^\circ \Rightarrow \theta_t = 0^\circ$ (Nas e desviado se
incide segundo a normal).

Quando tanto o feixe incidente como o feixe refletido têm a mesma estrutura espacial diz-se que se trata de uma reflexão Especular (espelho). Isto ocorre se os "defeitos" da superfície são pequenos relativamente ao comprimento de onda.

Quando a superfície não é plana, dá-se a reflexão Difusa

4.12

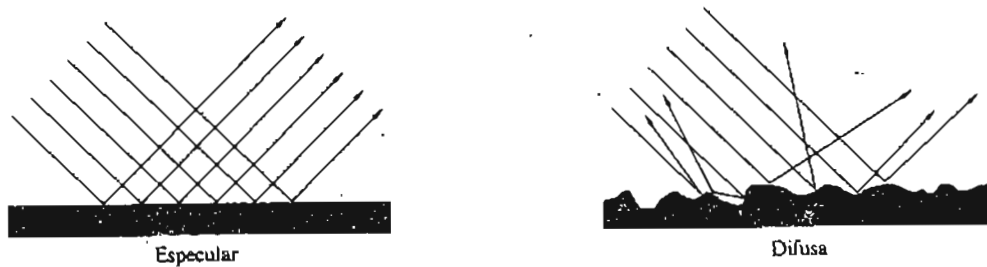


Figura 4.12 (a) Reflexão especular (b) Reflexão difusa (fotografias cedidas por Donald Dunitz).

PRINCÍPIO DE FERMAT

A primeira formulação deste princípio foi feita por Hero de Alexandria (~ 150 A.C. e 250 D.C.) que afirmou que a luz ao propagar-se entre dois pontos, S e P, através de uma superfície reflectora, escolhe o caminho mais curto possível.

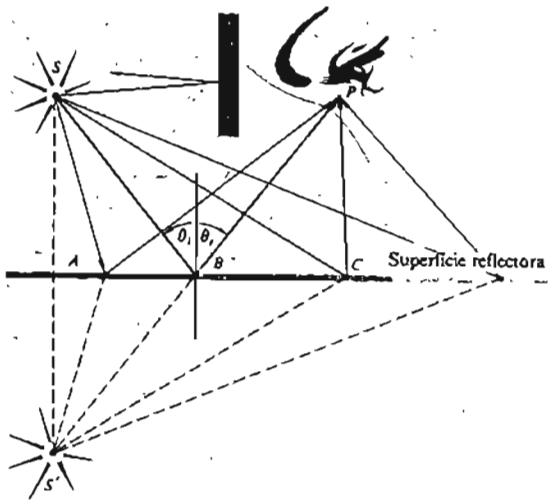


Figura 4.14 Percurso mínimo da fonte S até ao olhos do observador em P.

Para desenhar esta figura utilizamos uma "fonte virtual" S' , que facilita a representação.

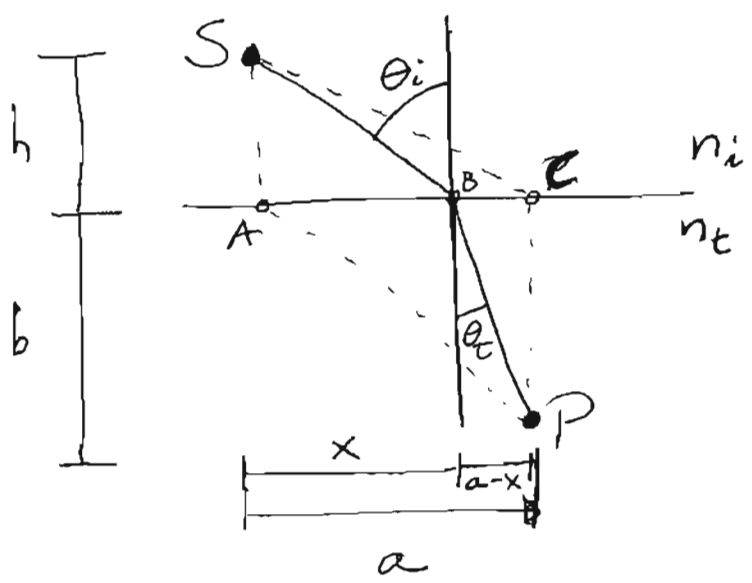
Qual a menor distância?

$S'AP$, $S'BP$ ou $S'CP$?
obviamente $S'BP$

Esta afirmação funciona para a reflexão, mas e para a refração??

Fermat "resolven" o problema alterando o enunciado, propondo o Princípio do Tempo Mínimo:

A trajetória seguida por um raio luminoso entre dois pontos é aquela que é percorrida no menor intervalo de tempo!



Vamos ver qual é o tempo que demora a chegar de S até P, para diferentes B (para diferentes posições de X)

$$t = \frac{\overline{SB}}{v_i} + \frac{\overline{BP}}{v_t}$$

$$\overline{SB} = \sqrt{x^2 + h^2}$$

$$\overline{BP} = \sqrt{b^2 + (a-x)^2}$$

Para saber onde é o mínimo de t em função de x derivamos $\frac{dt}{dx}$ e igualamos a zero:

$$\frac{dt}{dx} = 0 = \frac{x}{v_i \sqrt{h^2 + x^2}} + \frac{-(a-x)}{v_t \sqrt{b^2 + (a-x)^2}}$$

$$\frac{1}{v_i} \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} = \frac{1}{v_t} \frac{(a-x)}{\sqrt{b^2 + (a-x)^2}}$$

$$\frac{1}{v_i} \sin \theta_i = \frac{1}{v_t} \sin \theta_t$$

$$\boxed{n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t}$$

Generalizando para um meio com m camadas, v_{i0}

$$t = \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} + \dots + \frac{s_m}{v_m}$$

$$= \sum_{i=1}^m \frac{s_i}{v_i}$$

$$\text{ou } \boxed{t = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^m n_i s_i}$$

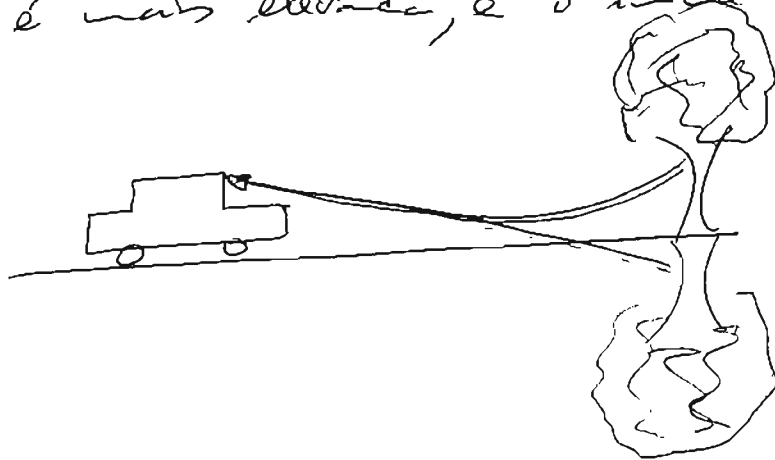
Em qe $\sum_{i=1}^m n_i s_i$ é o percurso óptico

distância x índice de refração = P. O.

Podemos reescrever o Princípio de Fermat como:

Entre dois pontos a luz segue a trajetória segundo a qual o percurso óptico é mínimo

Isto significa qe quando o índice de refração não é homogêneo, a luz não segue em linha recta! (Por exemplo no verão vemos uma estrada espelhada, devido a este efeito, porque perto à estrada a temperatura é mais elevada, e o índice de refração menor)

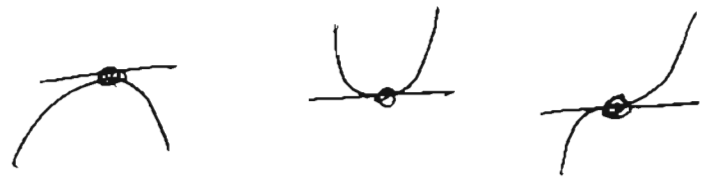


Deves referir q o enunciado qe apresentas para o principio de Fermat tem alguns falhas, puzq nã explica p exempo o qe ocorre entre os dois focos de uma elipse (em qe o P.O. e sempre igual).

Por isso, ~~este~~ o Principio de Fermat deve ser enunciado da seguinte forma:

A LUZ PROPAGA-SE ENTRE DOIS PONTOS DISTINTOS, AO LONGO DE UMA TRAJECTORIA PARA A QUAL O PERCURSO OPTICO TOTAL TEM UM COMPORTAMENTO ESTACIONARIO RELATIVAMENTE A VARIAÇÕES DESTA TRAJECTORIA

Da seja, quando $\frac{dt}{dx} = 0$, seja esse ponto um maximo, um minimo ou um ponto de inflexão



O qe isto significa e qe as ondas qe seguem caminhos diferentes tem qe ter o mesmo P.O. (o mesmo valor)

Essas ondas, que se propagam por trajetórias diferentes mas com o mesmo P.O., chegam ao ponto com a mesma fase, ~~fo~~ logo somam-se.

Se as ondas seguirem outras trajetórias, chegam ao ponto com fase diferentes, e a soma vai ser, em média, zero!

Função de onda que o P.O. de S para P é igual ao de P para S. Ou seja, as trajetórias são Reversíveis

Nota: Este tipo de formulação, em que se fala de variáveis, e de como elas afetam o comportamento de outras grandezas, encontra aplicações e muitos exemplos, da Física e não só.