

## Natureza da luz: refracción. Lei de Snell e ángulo límite

Nestas notas imos a aplicar a lei de Snell e a comprender o concepto de ángulo límite.

Supoñamos un raio de luz que vai dende o ar á auga baixo un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ . Calculemos o ángulo de refracción:

Medio 1: ar

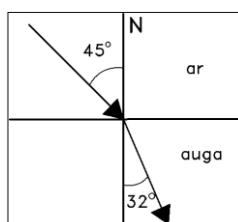
Medio 2: auga

$$n_1 = 1, \hat{i} = 45^\circ \rightarrow n_2 = \frac{4}{3}, \hat{r} = ?$$

$$\text{Aplicando a Lei de Snell: } n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$1 \cdot \text{sen } 45^\circ = \frac{4}{3} \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow \hat{r} = \mathbf{32,03^\circ}$$

Ou sexa, que o raio achéga-se á normal:



Supoñamos agora que o raio de luz vai dende a auga hacia o ar co mesmo ángulo de incidencia,  $45^\circ$ :

Medio 1: auga

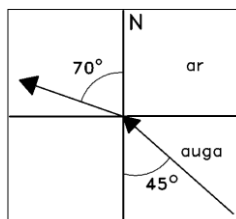
Medio 2: ar

$$n_1 = \frac{4}{3}, \hat{i} = 45^\circ \rightarrow n_2 = 1, \hat{r} = ?$$

$$\text{Aplicando a Lei de Snell: } n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$\frac{4}{3} \cdot \text{sen } 45^\circ = 1 \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow \hat{r} = \mathbf{70,53^\circ}$$

Ou sexa que agora o raio afasta-se da normal:



Chamamos ángulo límite ao ángulo de incidencia que da lugar a que o raio saia refractado baixo un ángulo de  $90^\circ$ . Resulta evidente que este fenómeno só acontecerá se o raio de luz vai dun medio lento a un medio rápido, por exemplo cando vai de auga ao ar, cal é este segundo caso. Calculemos pois este ángulo límite:

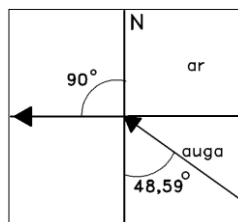
Medio 1: auga

Medio 2: ar

$$n_1 = \frac{4}{3}, \hat{i} = \hat{L} \rightarrow n_2 = 1, \hat{r} = 90^\circ$$

$$\text{Aplicando a Lei de Snell: } n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$\frac{4}{3} \cdot \text{sen } \hat{L} = 1 \cdot \text{sen } 90^{\circ} = 1 \rightarrow \hat{L} = 48,59^{\circ}$$



Este é o ángulo límite. A partir do valor calculado, se aumentamos o ángulo de incidencia, a luz xa non sofre refracción senon que a reflexión é total.

Imos estudar o sistema vidro-ar.

Comecemos estudando a refracción dun raio de luz cando este avanta dende o ar ao vidro, un medio máis lento, baixo un ángulo de incidencia de  $45^{\circ}$ :

Medio 1: ar                                  Medio 2: vidro

$$n_1 = 1, \hat{i} = 45^{\circ} \rightarrow n_2 = \frac{3}{2}, \hat{r} = ?$$

Aplicando a Lei de Snell:  $n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$

$$1 \cdot \text{sen } 45^{\circ} = \frac{3}{2} \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow \hat{r} = 19,47^{\circ}$$

O raio achéga-se á normal, como xa agardabamos.

Agora fagamos o percorrido contrario:

Medio 1: vidro                                  Medio 2: ar

$$n_1 = \frac{3}{2}, \hat{i} = 45^{\circ} \rightarrow n_2 = 1, \hat{r} = ?$$

Aplicando a Lei de Snell:  $n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$

$$\frac{3}{2} \cdot \text{sen } 45^{\circ} = 1 \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow \hat{r} = \text{non hai resultado}$$

Iso quere dicir que con  $45^{\circ}$  xa superamos o ángulo límite.

Calculemos o ángulo límite para o sistema vidro-ar:

Medio 1: vidro                                  Medio 2: ar

$$n_1 = \frac{3}{2}, \hat{i} = \hat{L} \rightarrow n_2 = 1, \hat{r} = 90^{\circ}$$

Aplicando a Lei de Snell:  $n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$

$$\frac{3}{2} \cdot \text{sen } \hat{L} = 1 \cdot \text{sen } 90^{\circ} = 1 \rightarrow \hat{L} = 41,81^{\circ}$$

## Óptica física (Tema 7)

### Exercicio 1

(Seletividade setembro 2008) Un raio de luz incide dende o aire ( $n=1$ ) sobre unha lámina de vidro de índice de refracción  $n=1,5$ . O ángulo límite para a reflexión total deste raio é: a)  $41,8^\circ$ ; b)  $90^\circ$ ; c) non existe.

O raio de luz vai dun medio rápido (o ar,  $n=1$ ) a un medio lento (vidro,  $n=1,5$ ), polo que o raio refractado achegará-se á normal e non existe ángulo límite nin reflexión total.

Explica-o:

### Exercicio 2

(Seletividade setembro 2007) Cando un raio de luz incide nun medio de menor índice de refracción, o raio refractado: a) varía a súa frecuencia, b) acértese a normal, c) pode non existir raio refractado.

Como xa vimos na introdución, cando o medio ten menor índice de refracción, entón a velocidade da luz nese medio é maior e o raio refractado achega-se á normal.

### Exercicio 3

(Seletividade xuño 2009) Unha onda luminosa: a) non se pode polarizar; b) a súa velocidade de propagación é inversamente proporcional ó índice de refracción do medio; c) pode non ser electromagnética.

A luz é unha onda transversal (póde-se polarizar) e electromagnética (non precisa dun medio material para se transmitir)

O índice de refracción dun medio non é máis que a proporción entre a velocidade da luz no vacío e a velocidade da luz nese medio:

$$n_m = \frac{c}{v_m}$$

O índice de refracción vai ser sempre  $n_m \geq 1$  e ademais de acordo coa expresión anterior, a velocidade no medio  $m$  é inversamente proporcional ao índice de refracción como se desprende da expresión anterior:

$$v_m = \frac{c}{n_m}$$

Así que a contestación correcta é a **b)**

### Exercicio nº7

(Seletividade xuño 2010) A luz visible abrangue un rango de frecuencias que vai desde (aproximadamente)  $4,3 \cdot 10^{14}$  Hz (vermello) ata  $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz (ultravioleta); ¿cal das seguintes afirmacións é correcta?:

- a) a luz vermella ten menor lonxitude de onda cá ultravioleta;
- b) a ultravioleta é a máis enerxética do espectro visible;
- c) ambas aumentan a lonxitude de onda nun medio con maior índice de refracción có aire.

#### Contestación a)

Luz visibel:  $f_{\text{vermello}} = 4,3 \cdot 10^{14}$  Hz e  $f_{\text{ultravioleta}} = 7,5 \cdot 10^{14}$  Hz

Teremos en conta que  $c = f \cdot \lambda$  na que  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s

Podemos calcular as lonxitudes de onda correspondentes:

$$\lambda_{\text{vermello}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 6,98 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 698 \text{ nm}$$

Agora podes calcular a lonxitude de onda correspondente ao ultravioleta:

$$\lambda_{\text{ultravioleta}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 400 \text{ nm}$$

A resposta a) é incorreta.

#### Contestación c)

O índice de refracción nun medio calquera que chamarei  $m$  ven dado pola expresión:

$$n_m = \frac{c}{v_m} \text{ e polo tanto: } n_m \cdot v_m = c \quad (1)$$

Por outra banda:  $v_m = \lambda_m \cdot f$  e substituíndo en (1) obtemos que:

$$n_m \cdot \lambda_m \cdot f = c \rightarrow \lambda_m = \frac{c}{n_m \cdot f}$$

Observa que **se aumenta o índice de refracción a lonxitude de onda diminúe**, e polo tanto compróba-se que a contestación é incorreta.

#### Só pode ser a b)

Nas ondas eletromagnéticas a enerxía ven definida pola ecuación de Planck que veremos nun próximo tema, e que expresa que a enerxía está cuantizada, é dicir, que so pode ser intercambiada en cantidades discretas que chamamos **cuantos** definidos pola expresión:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

Nesta expresión  $E$  é a enerxía,  $h$  é a constante de Planck e  $f$  é a frecuencia da onda eletromagnética e  $n$  é un número enteiro.

### Exercicio 8

Se o índice de refracción do diamante é 2,52 e o do vidro 1,27:

- a) a luz propága-se con maior velocidade no diamante;
- b) o ángulo límite entre o diamante e o aire é menor que entre o vidro e o aire;
- c) cando a luz pasa do diamante ao vidro o ángulo de incidencia é maior que o ángulo de refracción.

Vaíamos analisando unha a unha as posibles respostas.

a) Falso.

O índice de refracción é a relación entre a velocidade no medio e a velocidade no vacío. Daquela facendo uso da expresión do índice de refracción:

$$n_{\text{diamante}} = \frac{c}{v_{\text{diamante}}} \rightarrow v_{\text{diamante}} = \frac{c}{n_{\text{diamante}}} = \frac{c}{2,52}$$

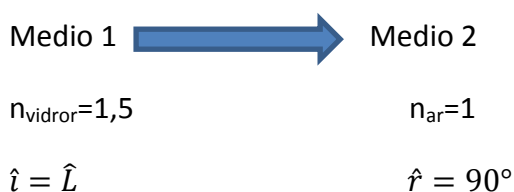
$$n_{\text{vidro}} = \frac{c}{v_{\text{vidro}}} \rightarrow v_{\text{vidro}} = \frac{c}{n_{\text{vidro}}} = \frac{c}{1,27}$$

Como ves, pon-se de manifesto que  $v_{\text{vidro}} > v_{\text{diamante}}$

b) Comparemos que ángulo límite é maior.

Para que exista ángulo límite, a luz de ir dende un medio lento hacia un medio rápido.

Comezamos polo sistema vidro-ar:



Xa comprobamos nun exercicio da introdución que o ángulo límite para este sistema da  $\hat{L} = 41,81^\circ$ . Repasa-o.

Agora imos analizar o sistema diamante-ar:

Medio 1  Medio 2

$$n_{\text{diamante}}=2,52$$

$$n_{\text{ar}}=1$$

$$\hat{i} = \hat{L}$$

$$\hat{r} = 90^\circ$$

$$n_{\text{diamante}} \cdot \text{sen } \hat{L} = n_{\text{ar}} \cdot \text{sen } 90^\circ$$

$$2,52 \cdot \text{sen } \hat{L} = 1 \rightarrow \hat{L} = 23,38^\circ$$

**Así que esta é a correcta.**

c) Que acontece cos ángulos cando a luz pasa do diamante ao vidro?

Medio 1  Medio 2

$$n_{\text{diamante}}=2,52$$

$$n_{\text{vidro}}=1$$

$$\hat{i}$$

$$\hat{r}$$

$$n_{\text{diamante}} \cdot \text{sen } \hat{i} = n_{\text{vidro}} \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$2,52 \cdot \text{sen } i = 1,5 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

E xa está. Investiga-o se queres máis pensa-o un pouquiño.

Observa que neste sistema o raio da luz pasa dun sistema máis lento a outro un pouco máis rápido e polo tanto o raio refratado separa-se da normal, polo que  $\hat{r} > \hat{i}$

### Exercicio 10

**(Seletividade setembro 2010) Cando un raio de luz monocromática pasa desde o aire á auga (nauga = 4/3), prodúcese un cambio: a) na frecuencia; b) na lonxitude de onda; c) na enerxía.**

A enerxía no caso dunha onda eletromagnética ven dada segundo a expresión:

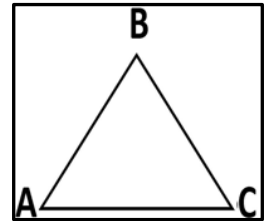
$$E = n \cdot h \cdot f$$

Nesta expresión, a enerxía transfírese en cuantos, cantidades discretas  $h \cdot f$  que son indivisibeis. Polo tanto a enerxía da onda eletromagnética depende da constante de Planck e da frecuencia. Cando a luz cambea de medio cambea de velocidade mais non de frecuencia.

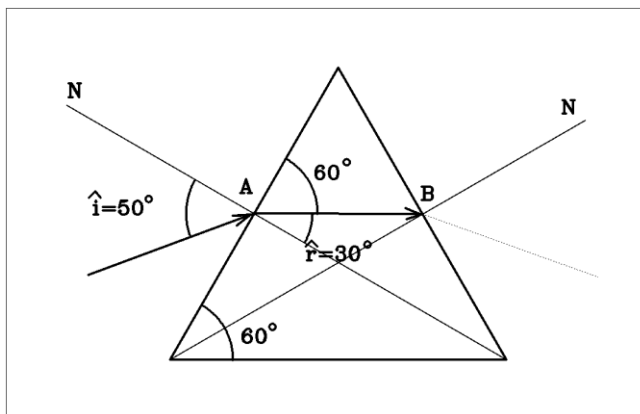
Como a velocidade é:  $v = \lambda \cdot f$  e cambia a velocidade mais permanece constante a frecuencia, enton o que cambia é a lonxitude de onda.

**Exercicio 11**

(Seletividade setembro 2011) Sobre un prisma equilátero de ángulo  $60^\circ$  (ver figura), incide un raio luminoso monocromático que forma un ángulo de  $50^\circ$  coa normal á cara AB. Sabendo que no interior do prisma o raio é paralelo á base AC: a) calcula o índice de refracción do prisma; b) determina o ángulo de desviación do raio ao saír do prisma, debuxando a traxectoria que segue o raio; c) explica se a frecuencia e a lonxitude de onda correspondentes ao raio luminoso son distintas, ou non dentro e fóra do prisma. ( $n_{\text{aire}} = 1$ ).



Fagamos un bon debuxo dun triángulo equilátero e teremos bastante resolto:



O raio sofre unha dupla refracción.

No punto A de ar a vidro, e no punto B de vidro a ar.

Ademais do debuxo dedúcese que o ángulo de refracción do primeiro proceso é  $30^\circ$ .

O demais vai ser moi doado.

a) 1ª refracción:

Medio 1: ar  $\longrightarrow$  Medio 2: vidro

$$n_1 = 1$$

$$\hat{i} = 50^\circ$$

$$n_2 = n$$

$$\hat{r} = 30^\circ$$

$$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$1 \cdot \text{sen } 50^\circ = n_2 \cdot \text{sen } 30^\circ \rightarrow n_2 = 1,53$$

b) 2ª refracción: o debuxo permite ver o valor do ángulo de incidencia.

Medio 1: vidro  $\longrightarrow$  Medio 2: ar

$$n_1 = 1,53$$

$$n_2 = 1$$

$$\hat{i} = 30^\circ$$

$$\hat{r} = ??$$

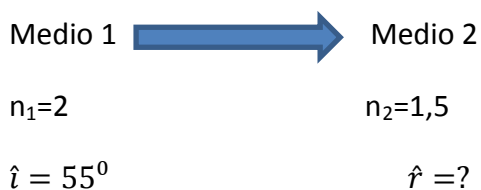
Coa Lei de Snell, calcula o ángulo de refracción:  $\hat{r} = 50^\circ$

c) Pois xa a estas alturas debes saber como contestar a esta cuestión.

Ao cambear de medio, cambea a velocidade e a lonxitude de onda, a frecuencia permanece constante.

### Exercicio nº24

O ángulo que forma un raio de luz coa normal á superficie de separación de dous medios é de  $55^\circ$ . Se o índice de refracción do medio onde procede o raio vale 2 e o índice de refracción do segundo medio é de 1,5; estuda se haberá raio refractado. En caso afirmativo, calcula o ángulo de refracción e, en caso negativo, calcula o valor máximo do ángulo de incidencia para que poida haber refracción.

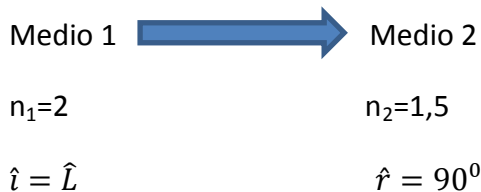


Comproba coa lei de Snell que non hai ángulo de refracción.

$$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$2 \cdot \text{sen } 50^\circ = 1,5 \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow \hat{r} = \textit{non existe}$$

Calcula enton o maior ángulo de incidencia para o que existe refracción, é dicir, calcula o ángulo límite.



$$2 \cdot \text{sen } \hat{L} = 1,5 \cdot \text{sen } 90^\circ \rightarrow \hat{L} = 48,59^\circ$$



### Exercicio nº25

Un raio de luz de lonxitude de onda  $\lambda = 0,70 \mu\text{m}$  (luz vermella) propága-se dende o ar cara á auga. Sabendo que o índice de refracción da auga é  $4/3$ , calcula a lonxitude de onda que posúe neste segundo medio. Sabendo que no espectro electromagnético a lonxitude de onda obtida no apartado anterior corresponde á cor verde, di que cor verá unha persoa mergullada na auga. (Solución:  $\lambda_{\text{auga}} = 0,525 \mu\text{m}$ ; cor vermella)



$$\text{Na auga: } n_{\text{auga}} = \frac{c}{v_{\text{auga}}} \text{ e polo tanto: } c = \frac{4}{3} \cdot v_{\text{auga}} = \frac{4}{3} \cdot f \cdot \lambda_{\text{auga}} \quad (1)$$

$$\text{Por outra banda no ar: } c = \lambda_{\text{ar}} \cdot f \quad (2)$$

Se igualas (1) con (2) obterás o resultado buscado:

$$\frac{4}{3} \cdot f \cdot \lambda_{\text{auga}} = \lambda_{\text{ar}} \cdot f$$

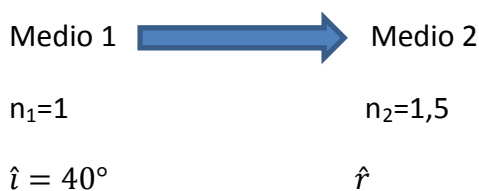
$$\lambda_{\text{auga}} = 0,525 \mu\text{m}$$

Un exercicio mais:

**Un raio de luz incide nun prisma de caras paralelas de vidro de índice de refracción 1,5, procedente do ar baixo un ángulo de incidencia de  $40^\circ$ . O prisma ten unha anchura de 10 cm. Logo de atravesar o prisma o raio volta a saír ao ar. Segue a marcha dos raios e calcula a distancia que o raio percorre dentro do prisma.**

O raio, no seu camiño, vai sufrir dúas refraccións. A primeira ao pasar do ar ao vidro e a segunda ao saír do vidro ao ar.

Estudemos a primeira:



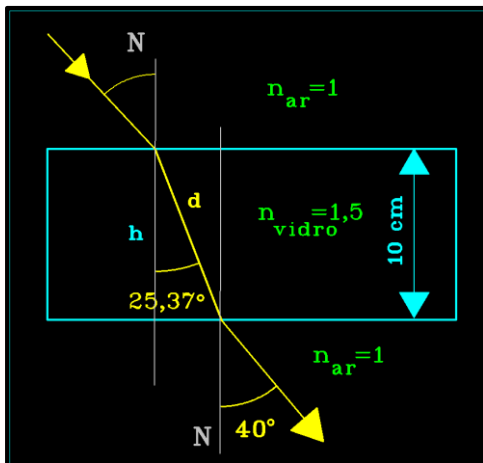
Podemos calcular o ángulo de refracción coa lei de Snell:

$$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$1 \cdot \text{sen } 40^\circ = 1,5 \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow \hat{r} = 25,37^\circ$$

Agora resolveremos a segunda refracción vidro-ar . Tendo en conta que o prisma é de caras paralelas, o raio incidirá na liña de separación baixo un ángulo de  $25,37^\circ$ .

Así que agora o índice de refracción do primeiro medio é o do vidro e o de chegada o do ar:



$$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$1,5 \cdot \text{sen } 25,37^\circ = 1 \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow \hat{r} = 40^\circ$$

Para calcular distancia que percorre o raio polo vidro, que é a distancia que no debuxo aparece citada como **d** observa que a distancia **h** está relacionada por medio do ángulo de  $25,37^\circ$ .

$$\cos 25,37^\circ = \frac{h}{d} = \frac{10 \text{ cm}}{d} \rightarrow d = 11,067 \text{ cm}$$