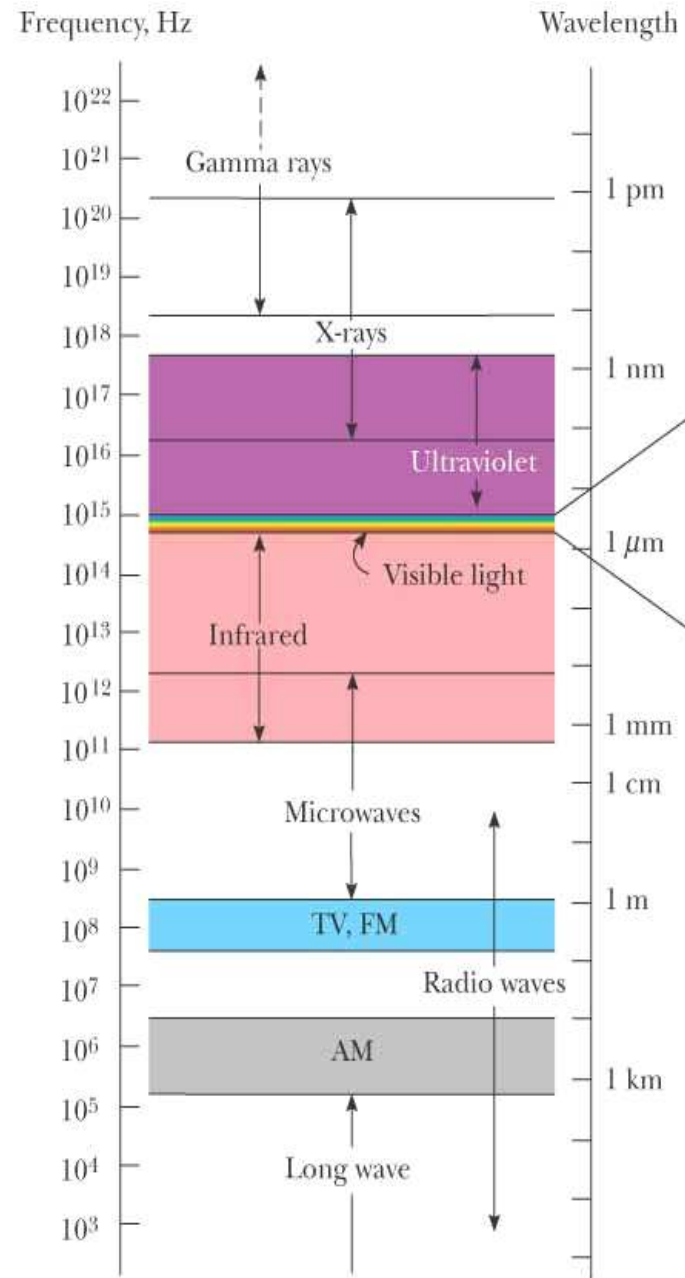


Ondas de Luz

El espectro electromagnético

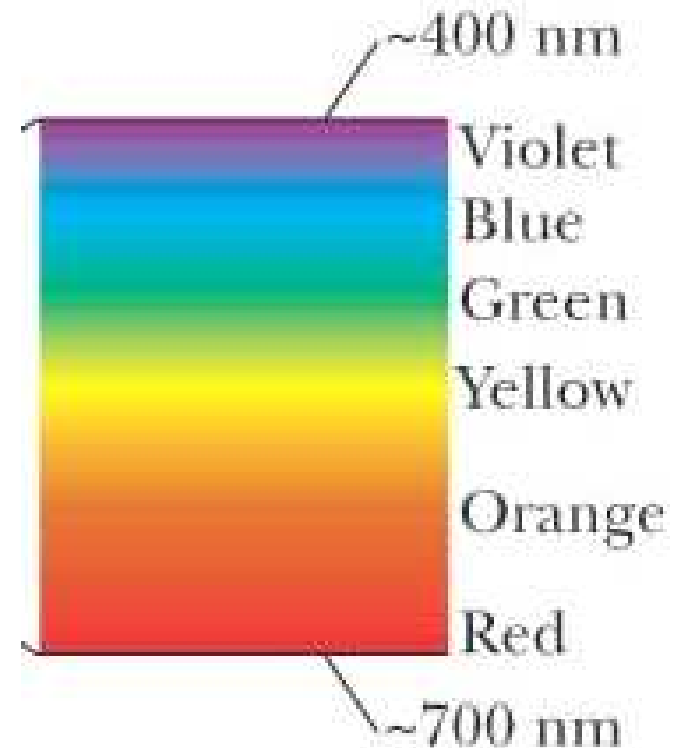
- **Radio Waves**
 - Wavelengths of more than 10^4 m to about 0.1 m
 - Used in radio and television communication systems
- **Microwaves**
 - Wavelengths from about 0.3 m to 10^{-4} m
 - Well suited for radar systems
 - Microwave ovens are an application
- **Infrared waves**
 - Wavelengths of about 10^{-3} m to 7×10^{-7} m
 - Incorrectly called “heat waves”
 - Produced by hot objects and molecules
 - Readily absorbed by most materials
- **Visible light**
 - Part of the spectrum detected by the human eye
 - Most sensitive at about 5.5×10^{-7} m (yellow-green)
- **Ultraviolet, X-rays and Gamma rays**



More About Visible Light

- Different frequencies (or wavelengths in vacuum) correspond to different colors
- The range of wavelength in vacuum is from red ($\lambda \sim 7 \times 10^{-7} \text{ m}$) to violet ($\lambda \sim 4 \times 10^{-7} \text{ m}$)

Wavelength Range (nm)	Color Description
400–430	Violet
430–485	Blue
485–560	Green
560–590	Yellow
590–625	Orange
625–700	Red



- Ultraviolet light
 - Covers about 4×10^{-7} m to 6×10^{-10} m
 - Sun is an important source of uv light
 - Most uv light from the sun is absorbed in the stratosphere by ozone
- X-rays
 - Wavelengths of about 10^{-8} m to 10^{-12} m
 - Most common source is acceleration of high-energy electrons striking a metal target
 - Used as a diagnostic tool in medicine

More notes on the EM wave Spectrum

- Gamma rays
 - Wavelengths of about 10^{-10} m to 10^{-14} m
 - Emitted by radioactive nuclei
 - Highly penetrating and cause serious damage when absorbed by living tissue
- Looking at objects in different portions of the spectrum can produce different information

La velocidad de la luz

- Hasta el siglo XVII se pensaba que la luz se propagaba instantáneamente, es decir, se creía que la velocidad de la luz era infinita.
- Galileo abordó esta cuestión en su famoso trabajo: *Diálogo acerca de dos ciencias*, publicado en 1638.
- Expuso sus argumentos mediante un diálogo entre varios personajes, entre ellos Simplicio y Sagredo (que representaba la voz de la razón, Galileo).

La velocidad de la luz

SIMPLICIO: La experiencia diaria nos muestra que la luz se propaga en forma instantánea; pues cuando vemos disparar una artillería a una gran distancia, el relámpago llega a nuestros ojos de inmediato, pero el sonido llega al oído un intervalo considerable.

SAGREDO: Pues bien, Simplicio, lo único que puedo deducir de esta experiencia familiar es que el sonido, al llegar a nuestros oídos, se desplaza más lentamente que la luz; pero no me dice si la luz llega instantáneamente o si tarda tiempo en hacerlo, por muy rápida que sea.

La velocidad de la luz, Fizeau, 1849

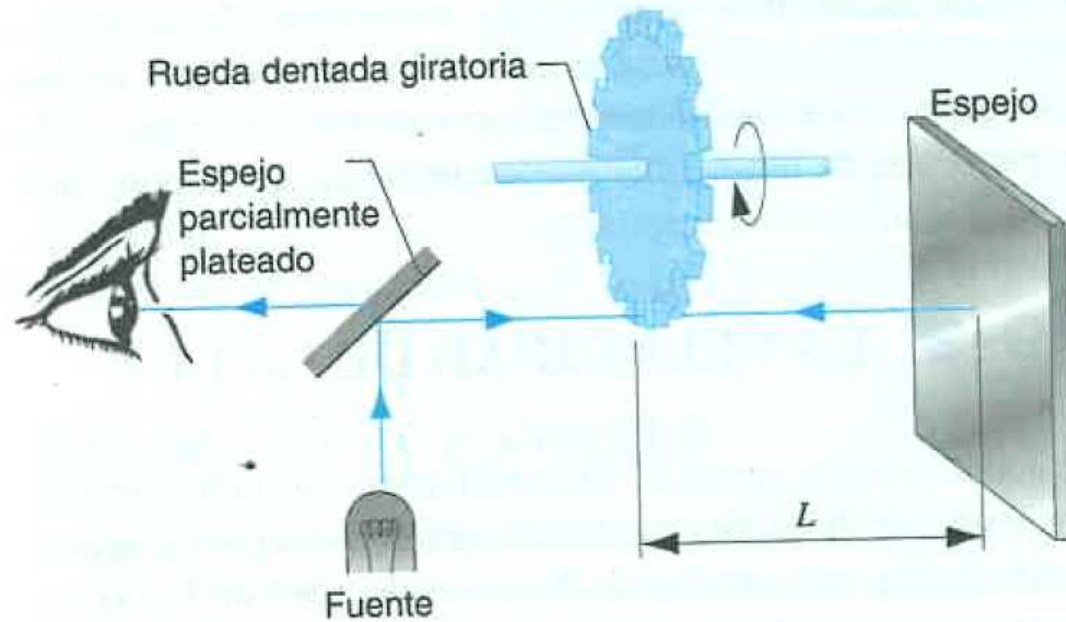


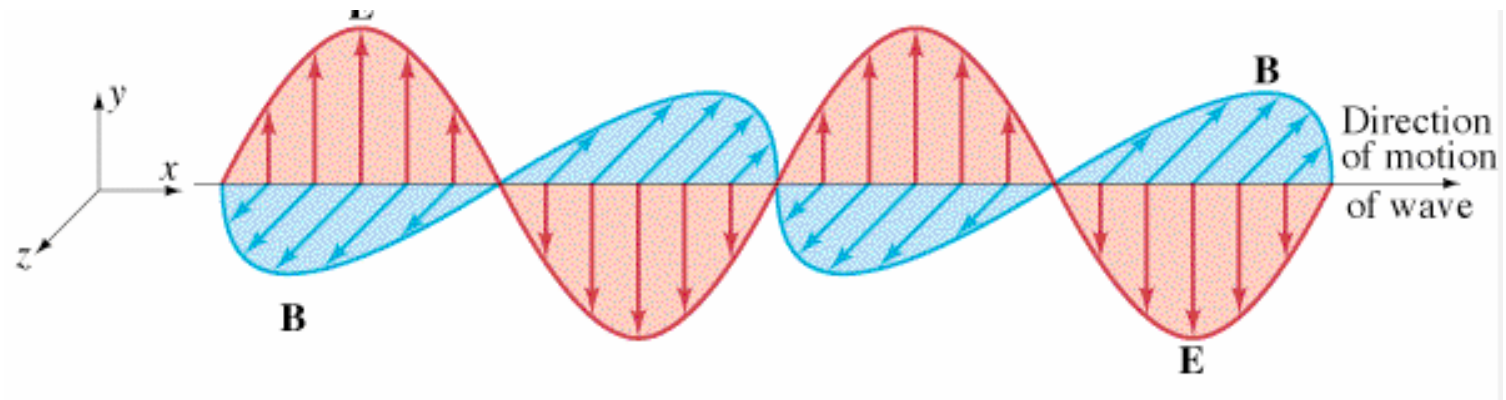
FIGURA 39-9. Diagrama esquemático del aparato con que Fizeau midió la velocidad de la luz.

La velocidad de la luz

TABLA 39-1 Velocidad de la radiación electromagnética en el espacio libre (algunas medidas seleccionadas)

<i>Fecha</i>	<i>Experimentador</i>	<i>País</i>	<i>Método</i>	<i>Velocidad</i> (km/s)	<i>Incertidumbre</i> (km/s)
1600(?)	Galileo	Italia	Linternas y ventanas	"Rapidez extraordinaria"	
1676	Roemer	Francia	Lunas de Júpiter	"Finita"	
1729	Bradley	Inglaterra	Aberración de la luz de estrellas	304,000	
1849	Fizeau	Francia	Rueda dentada	313,300	
1862	Foucault	Francia	Espejo giratorio	298,000	500
1880	Michelson	Estados Unidos	Espejo giratorio	299,910	50
1906	Rosa y Dorsey	Estados Unidos	Teoría electromagnética	299,781	10
1923	Mercier	Francia	Ondas estacionarias en alambres	299,782	15
1926	Michelson	Estados Unidos	Espejo giratorio	299,796	4
1950	Bergstrand	Suecia	Geodímetro	299,792.7	0.25
1950	Essen	Inglaterra	Cavidad de microondas	299,792.5	3
1950	Bol y Hansen	Estados Unidos	Cavidad de microondas	299,789.3	0.4
1951	Aslakson	Estados Unidos	Radar Shoran	299,794.2	1.9
1952	Rank y otros	Estados Unidos	Espectros moleculares	299,766	7
1952	Froome	Inglaterra	Interferómetro de microondas	299,792.6	0.7
1958	Froome	Inglaterra	Interferómetro de microondas	299,792.50	0.10
1967	Grosse	Alemania	Geodímetro	299,792.5	0.05
1973	Evenson y colaboradores	Estados Unidos	Métodos láser	299,792,4574	0.00
1978	Woods y colaboradores	Inglaterra	Métodos láser	299,792.4588	0.00
1987	Jennings y colaboradores	Estados Unidos	Métodos láser	299,792.4586	0.00

La velocidad de la luz en la materia



$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\kappa_m \kappa_e}} \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa_m \kappa_e}}$$

TABLA 39-2 Velocidad de la luz en algunos materiales^a

<i>Material</i>	<i>Velocidad de la luz (10^8 m/s)</i>
Vacío	3.00
Aire	3.00
Agua	2.26
Solución de azúcar (50%)	2.11
Vidrio Crown	1.97
Diamante	1.24

^a En una longitud de onda de 589 nm (luz amarilla de sodio).

Reflexión y refracción de las ondas de luz

Ley de la reflexión y ley de la refracción

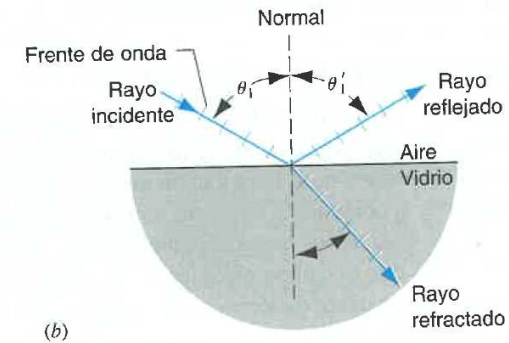
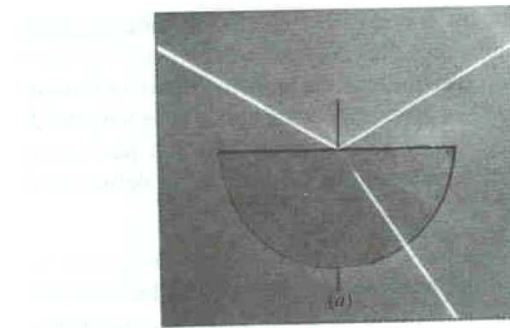
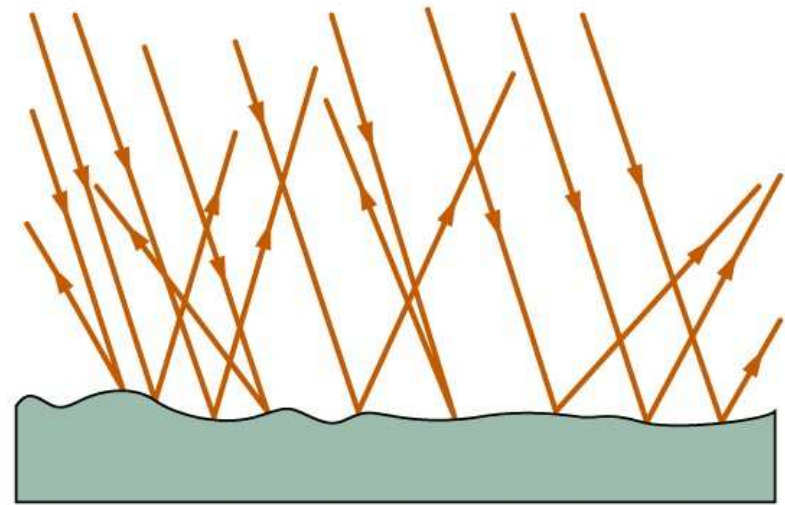
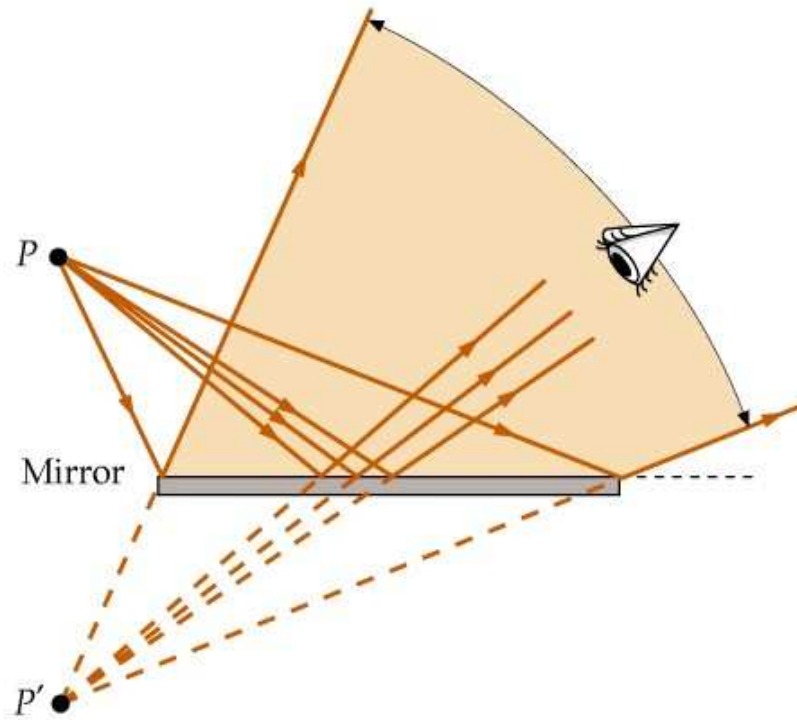


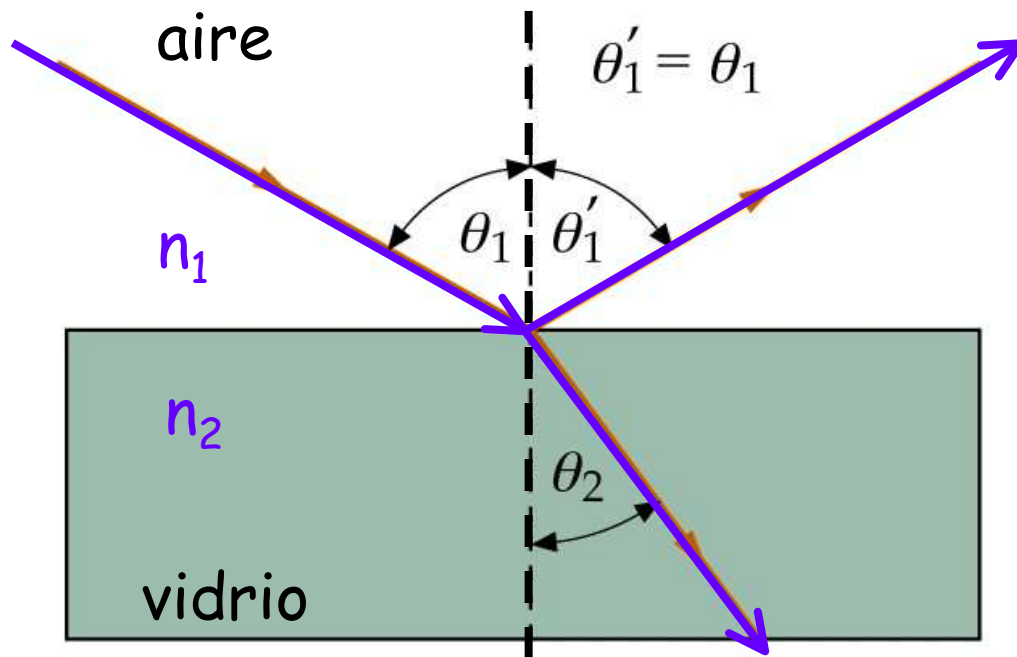
FIGURA 39-10. *a)* Fotografía que muestra la reflexión y la refracción de un haz luminoso que incide en una superficie plana de vidrio. *b)* Una representación gráfica por medio de rayos. Está marcados los ángulos de incidencia θ_1 , de reflexión θ_1' y de refracción θ_2 . Nótese que los ángulos se miden entre la normal a la superficie y el rayo correspondiente.

Ley de la reflexión

Tipos: reflexión especular y reflexión difusa.



3. Leyes de la reflexión y refracción



➤ Los rayos incidente, reflejado y refractado y la normal están contenidos en el plano de incidencia

➤ Ley de la reflexión

➤ Ley de la refracción

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2$$

Ley de Snell

Índice de refracción

$$n = \frac{c}{v}$$

$\left\{ \begin{array}{l} c, \text{ velocidad de la luz en el vacío} \\ v, \text{ velocidad de la luz en el medio} \end{array} \right.$

$n \geq 1$ $n_{\text{agua}}=1.33$; $n_{\text{vidrio}}=1.5$; $n_{\text{diamante}}=2.4$

-
- ✓ Homogéneos e isotrópicos $\implies n = \text{cte}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Vacío} \\ \text{Lentes ópticas} \\ \text{Cristales cúbicos} \end{array} \right.$
 - ✓ Anisótropos $\implies n$, depende de la dirección $\left\{ \begin{array}{l} \text{Todas las sustancias} \\ \text{cristalinas excepto} \\ \text{cúbicas} \end{array} \right.$
 - ✓ Heterogéneos $\implies n$ varía de un punto a otro $\left\{ \begin{array}{l} \text{Aire} \end{array} \right.$

TABLA 39-3 Algunos índices de refracción^a

<i>Medio</i>	<i>Índice</i>	<i>Medio</i>	<i>Índice</i>
Vacío (exactamente)	1.00000	Vidrio típico crown	1.52
Aire (STP)	1.00029	Cloruro de sodio	1.54
Agua (20°C)	1.33	Poliestireno	1.59
Acetona	1.36	Disulfuro de carbono	1.63
Alcohol etílico	1.36	Vidrio pesado de pedernal	1.72
Solución de azúcar (30%)	1.38	Zafiro	1.91
Cuarzo fundido	1.46	Vidrio muy pesado de pedernal	1.92
Solución de azúcar (80%)	1.49	Diamante	2.42

^a En una longitud de onda de 589 nm (luz amarilla de sodio).

Problema

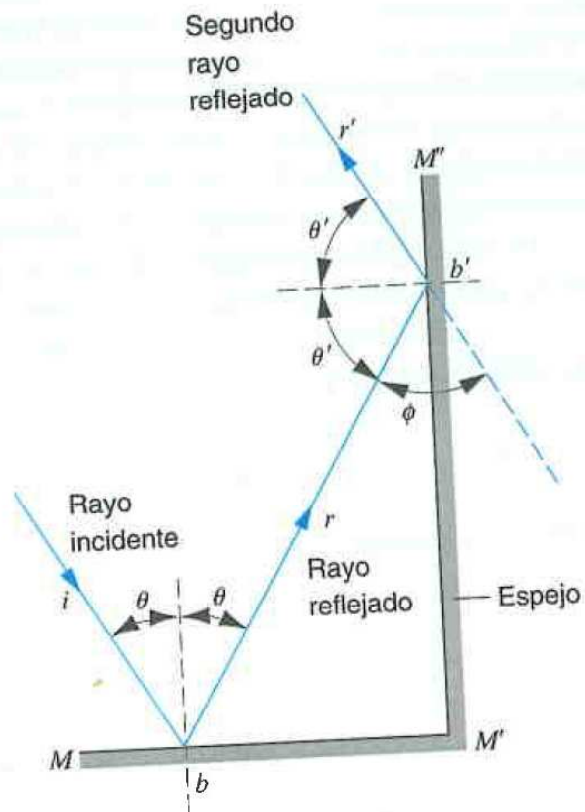
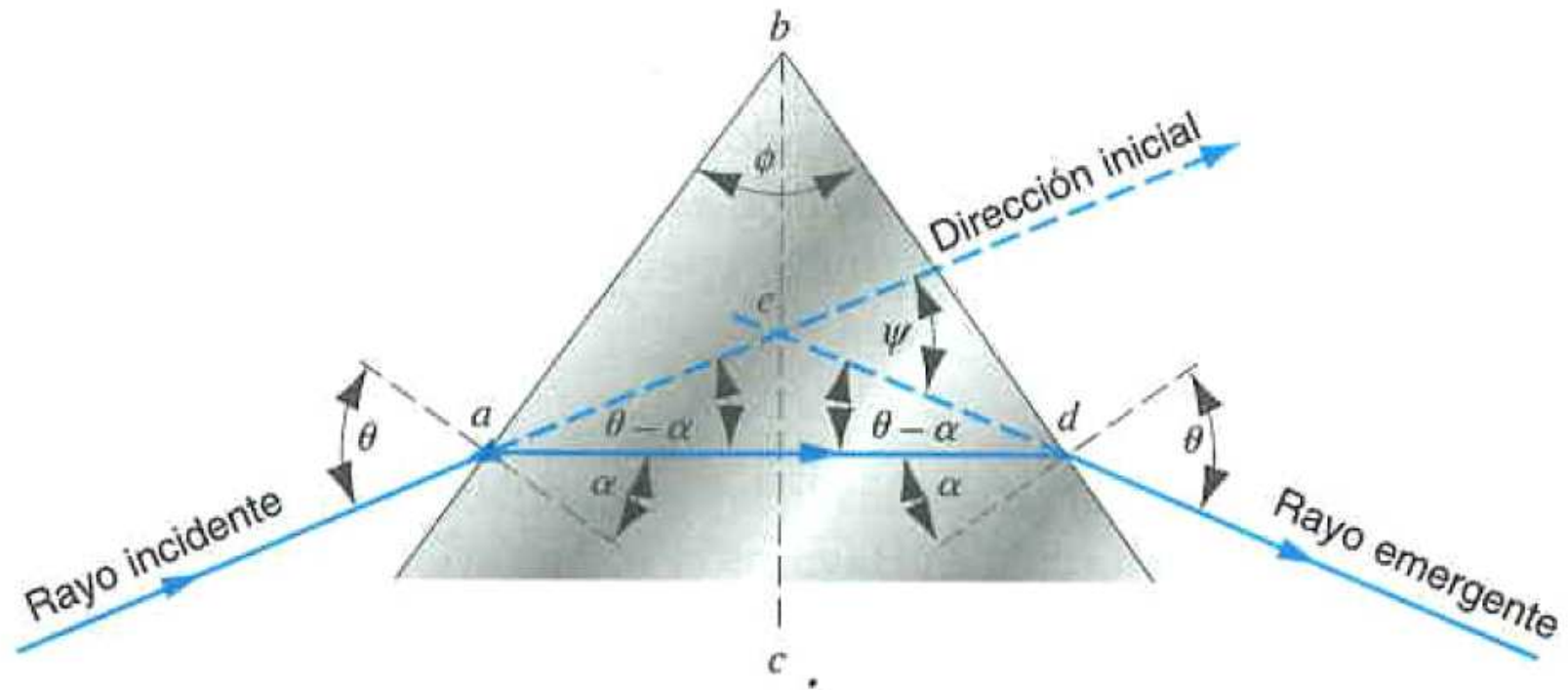


FIGURA 39-13. Problema resuelto 39-2. Reflector de esquina bidimensional.

Problema



FIG

Problema

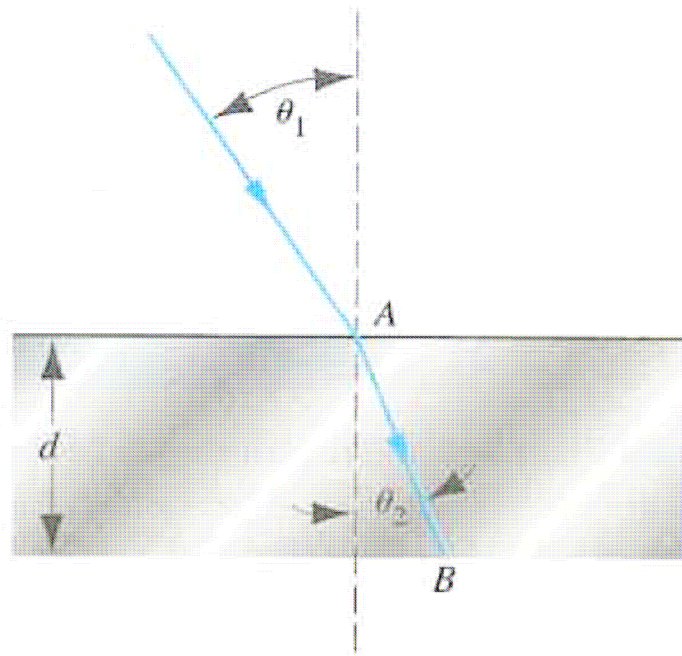


FIGURA 39-20. Problema resuelto 39-5.

Obtención de la ley de reflexión



Teoría de Huygens

- Porción de un frente de onda (FO) esférico que procede de un foco puntual.
- El FO es el lugar geométrico de los puntos con fase constante.
- Si en t el radio de FO es r , en el $t+\Delta t$ es $r+c\Delta t$

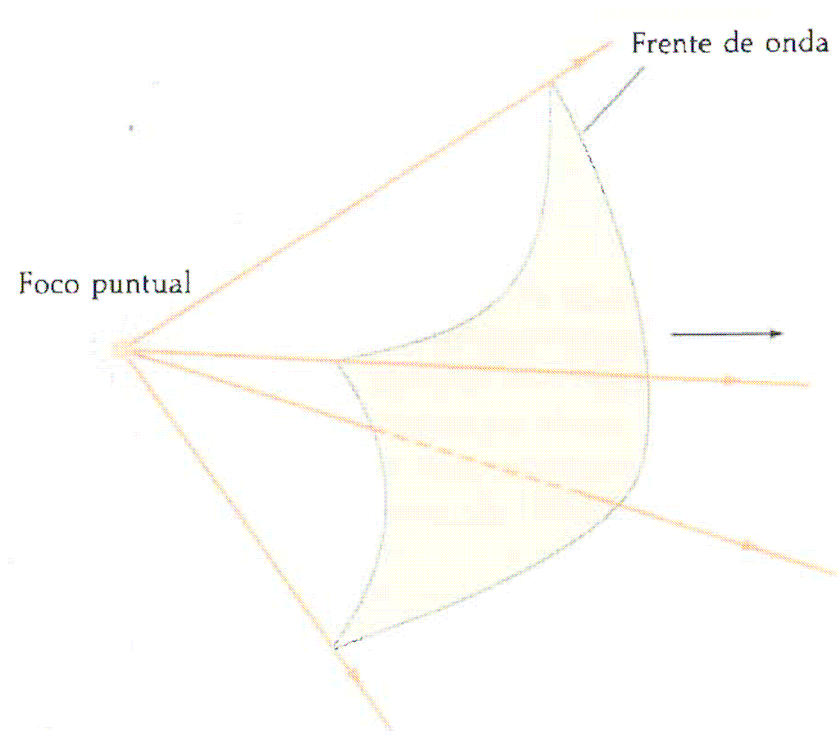


Figura 30-4 Frente de onda esférico procedente de un foco puntual.

Teoría de Huygens

Cada punto de un frente de onda primario sirve como foco de ondas elementales secundarias que avanzan con una velocidad y frecuencia igual a las de la onda primaria. El frente de onda primario al cabo de un cierto tiempo es la envolvente de estas ondas elementales.

- Como es natural, si todos los puntos de un FO fuesen realmente un foco puntual, habrían también ondas moviéndose hacia atrás. Huygens no tuvo en cuenta estas ondas en retroceso.

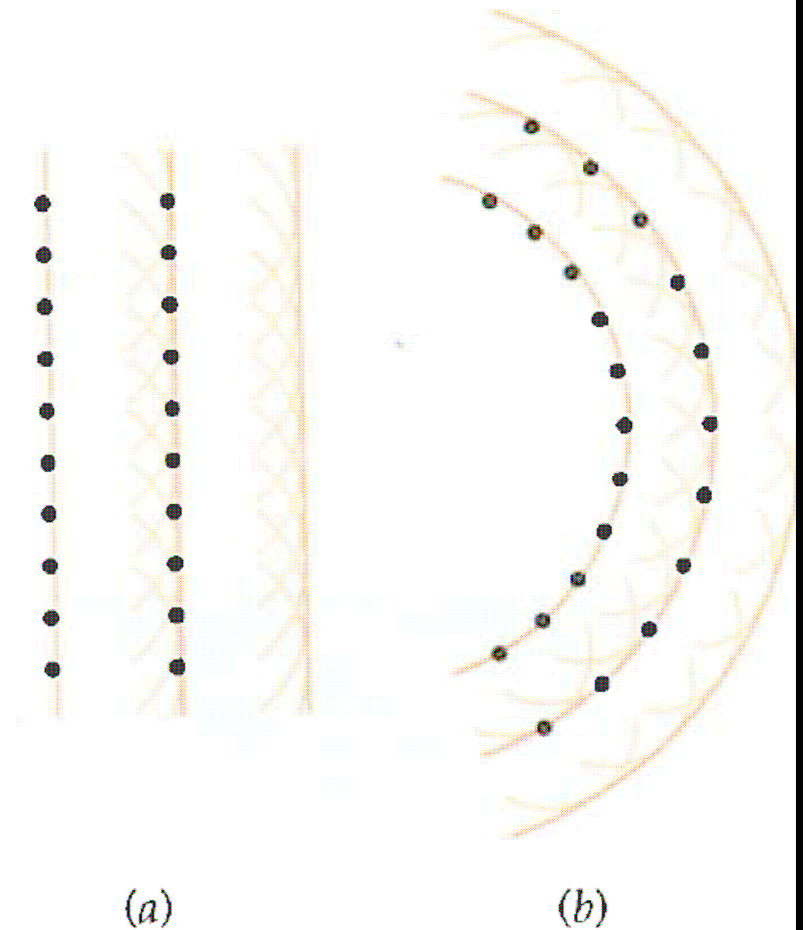
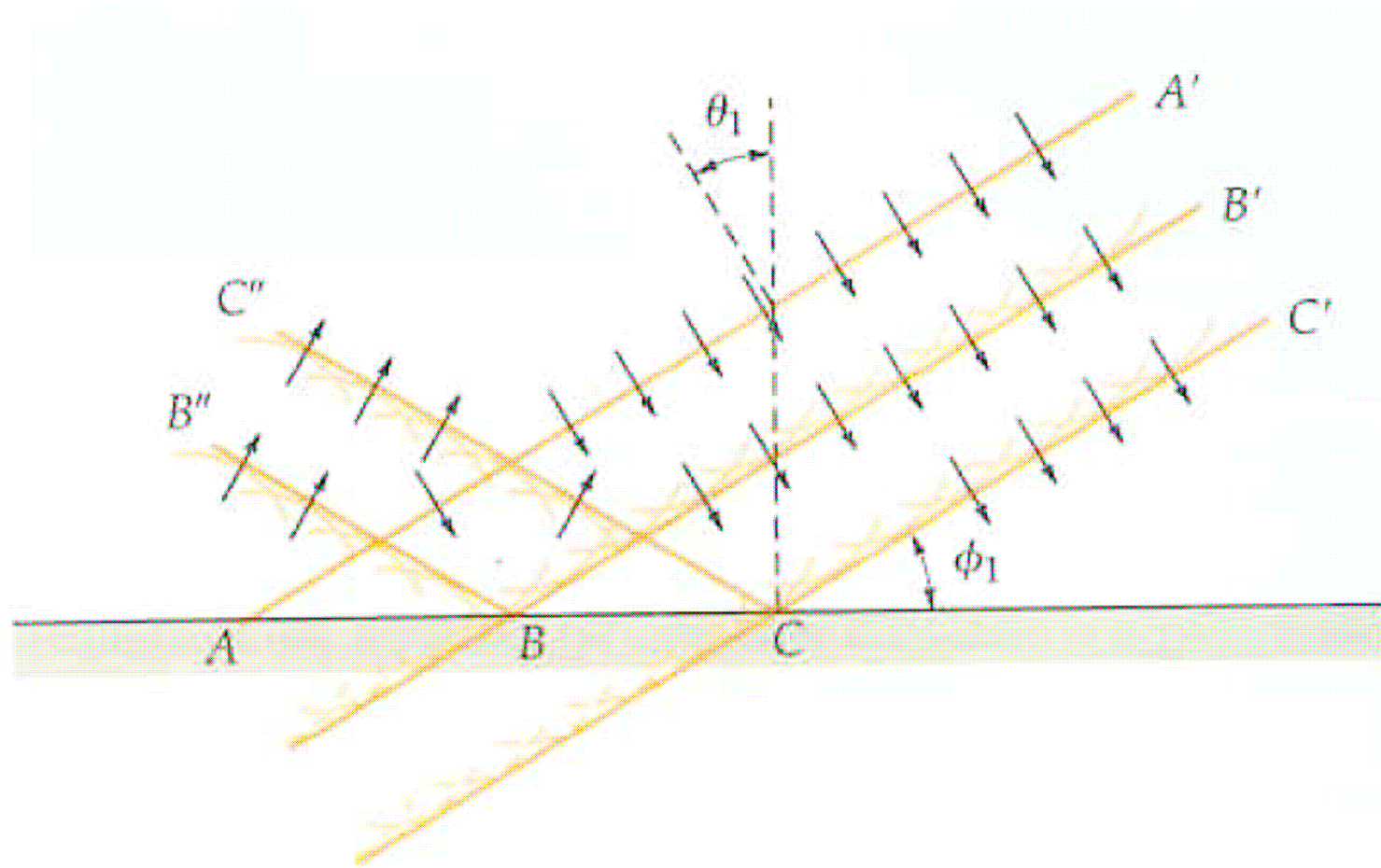
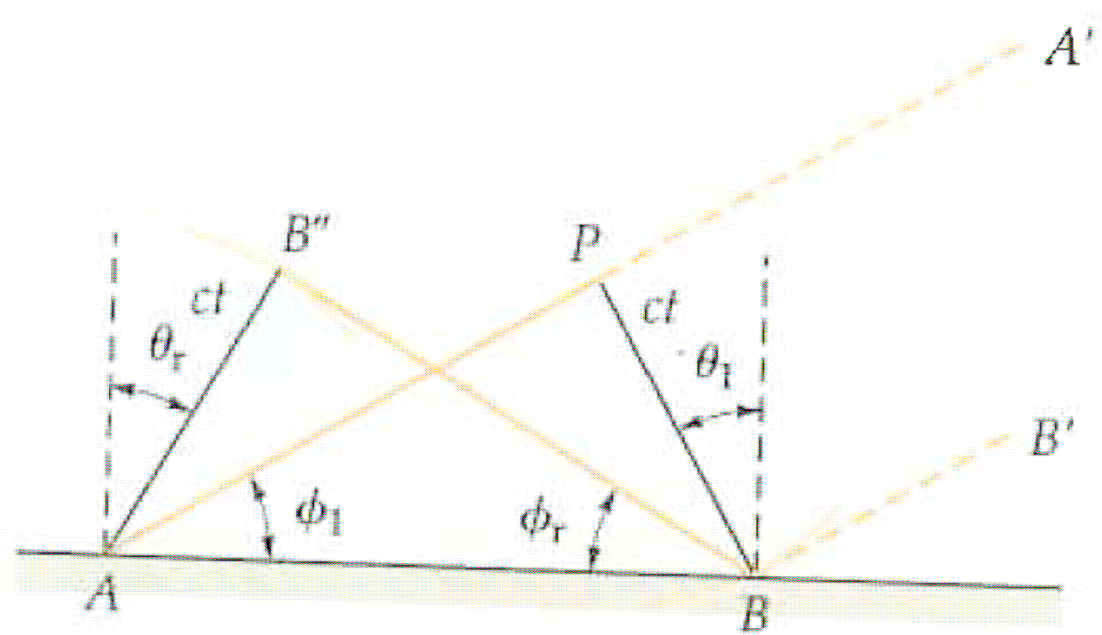
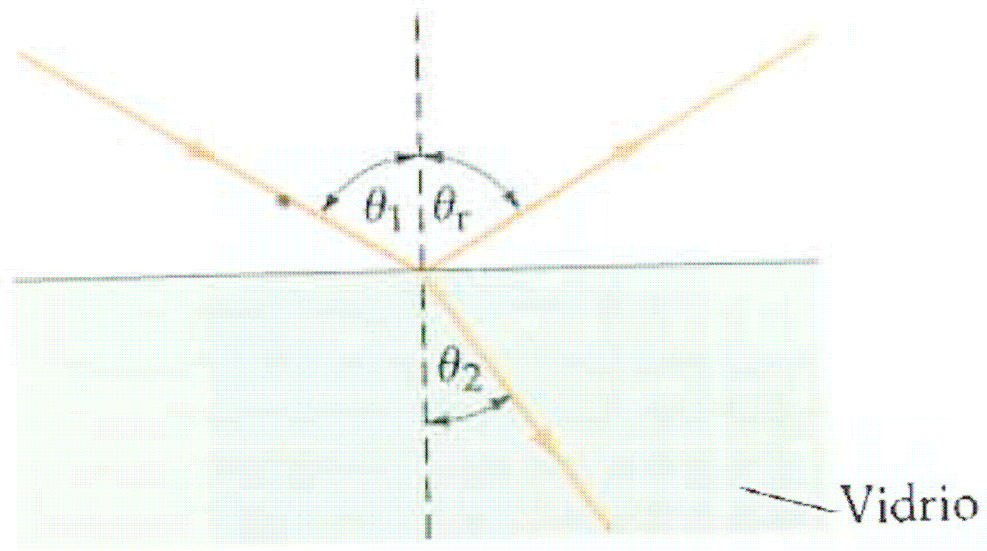


Figura 30-6 Construcción de Huygens para la propagación hacia la derecha de (a) una onda plana y (b) una onda esférica o circular de partida.





Obtención de la ley de refracción



(a)

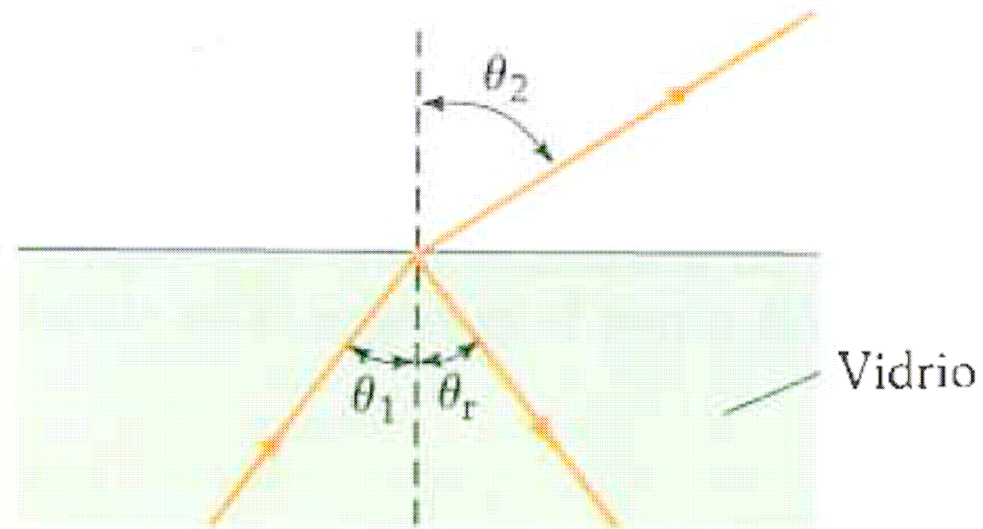


Figura 30-14 Refracción de un medio denso a otro menos denso. En este caso, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia. El rayo de luz se desvía alejándose de la normal.

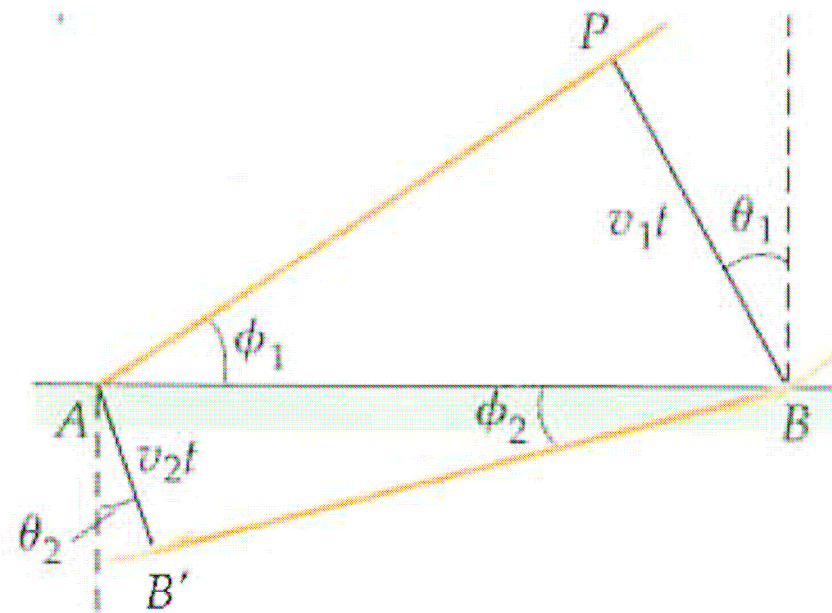


Figura 30-15 Aplicación del principio de Huygens a la refracción de ondas planas en la superficie que separa un medio, en el que la velocidad de la onda es v_1 , de otro en el que la velocidad es v_2 , inferior a v_1 . El ángulo de refracción en este caso es menor que el de incidencia.

Reflexión interna total

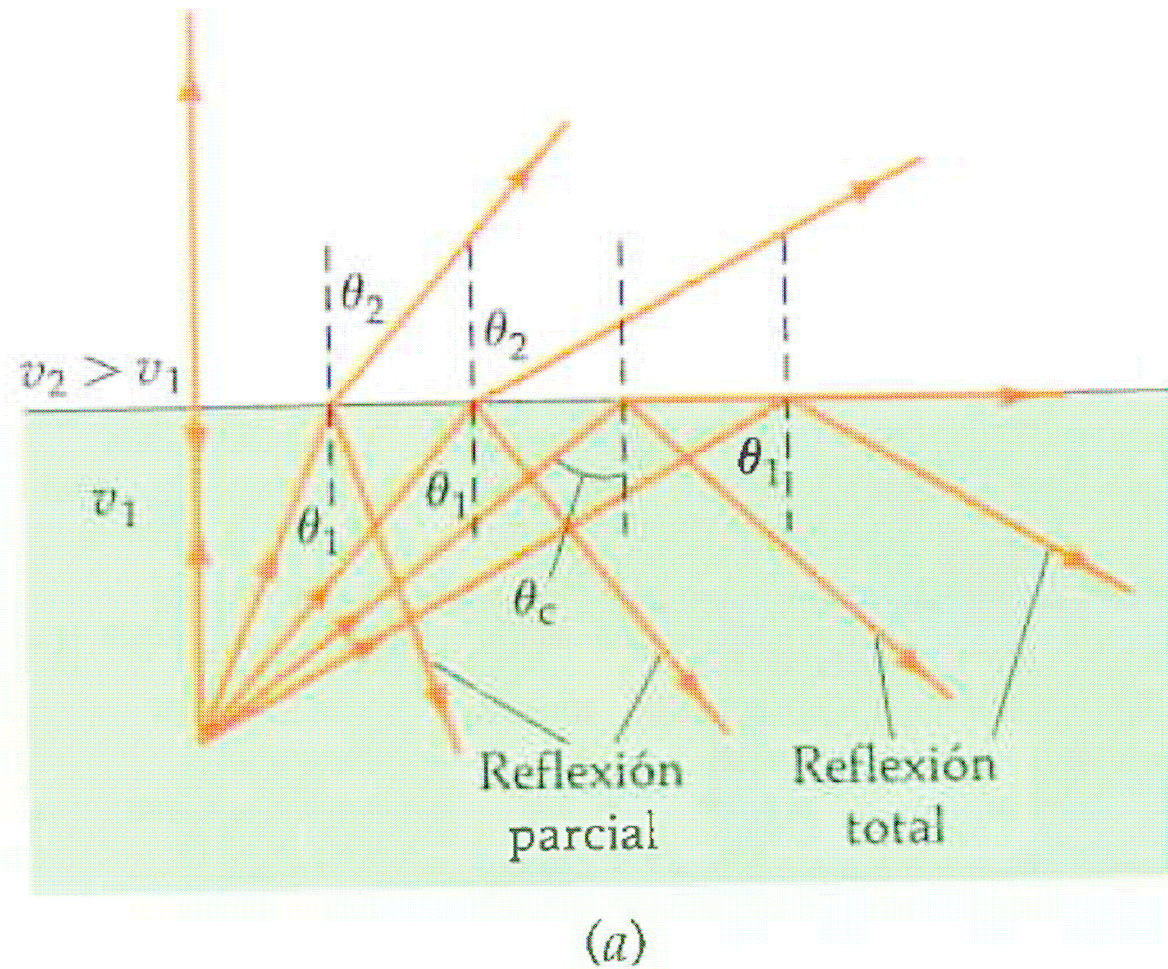
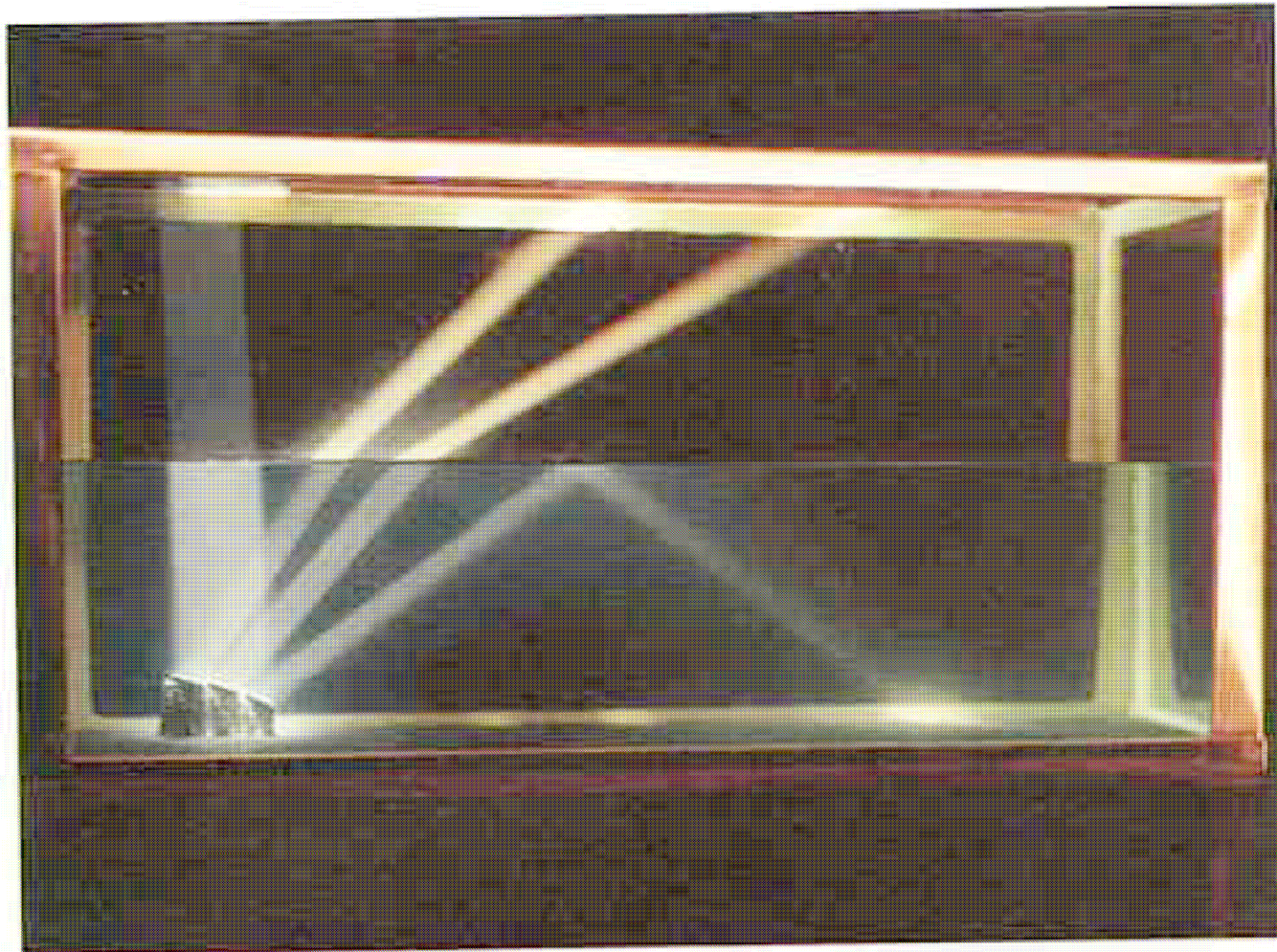


Figura 30-17 (a) Reflexión total interna. En el caso de la refracción del vidrio o del agua al aire, el rayo refractado se aleja de la normal. Cuando se hace aumentar el ángulo de incidencia, crece el ángulo de refracción hasta que, para un cierto ángulo crítico de incidencia θ_c , el ángulo de refracción



(b)

es 90° . Con ángulos de incidencia mayores que el crítico, no existe rayo refractado. Toda la energía se refleja. (b)
Fotografía de la refracción y de la reflexión interna total en una superficie agua-aire.

Problema

Principio de Fermat

Principio de Fermat. En 1650 Pierre Fermat* descubrió un principio muy importante, el cual puede expresarse en los siguientes términos:

Un rayo luminoso que pasa de un punto fijo a otro seguirá una trayectoria tal que, en comparación con las trayectorias cercanas, el tiempo requerido es mínimo, máximo o permanece inalterado (esto es, estacionario).

Obtención de la ley de reflexión

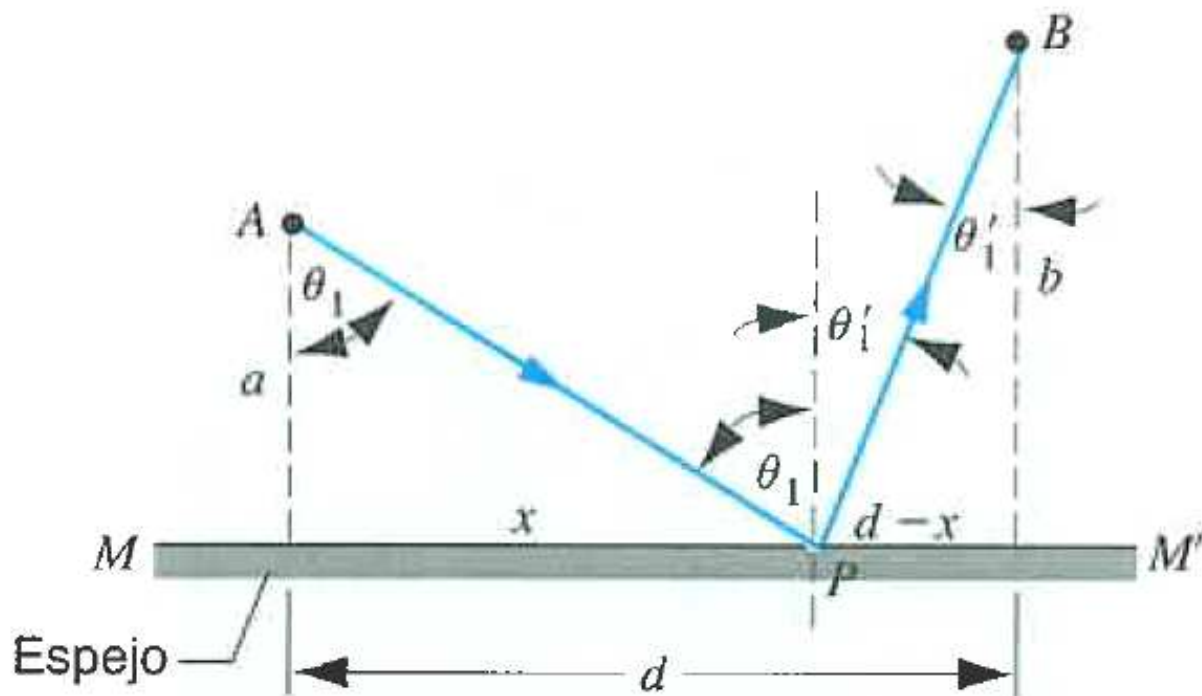


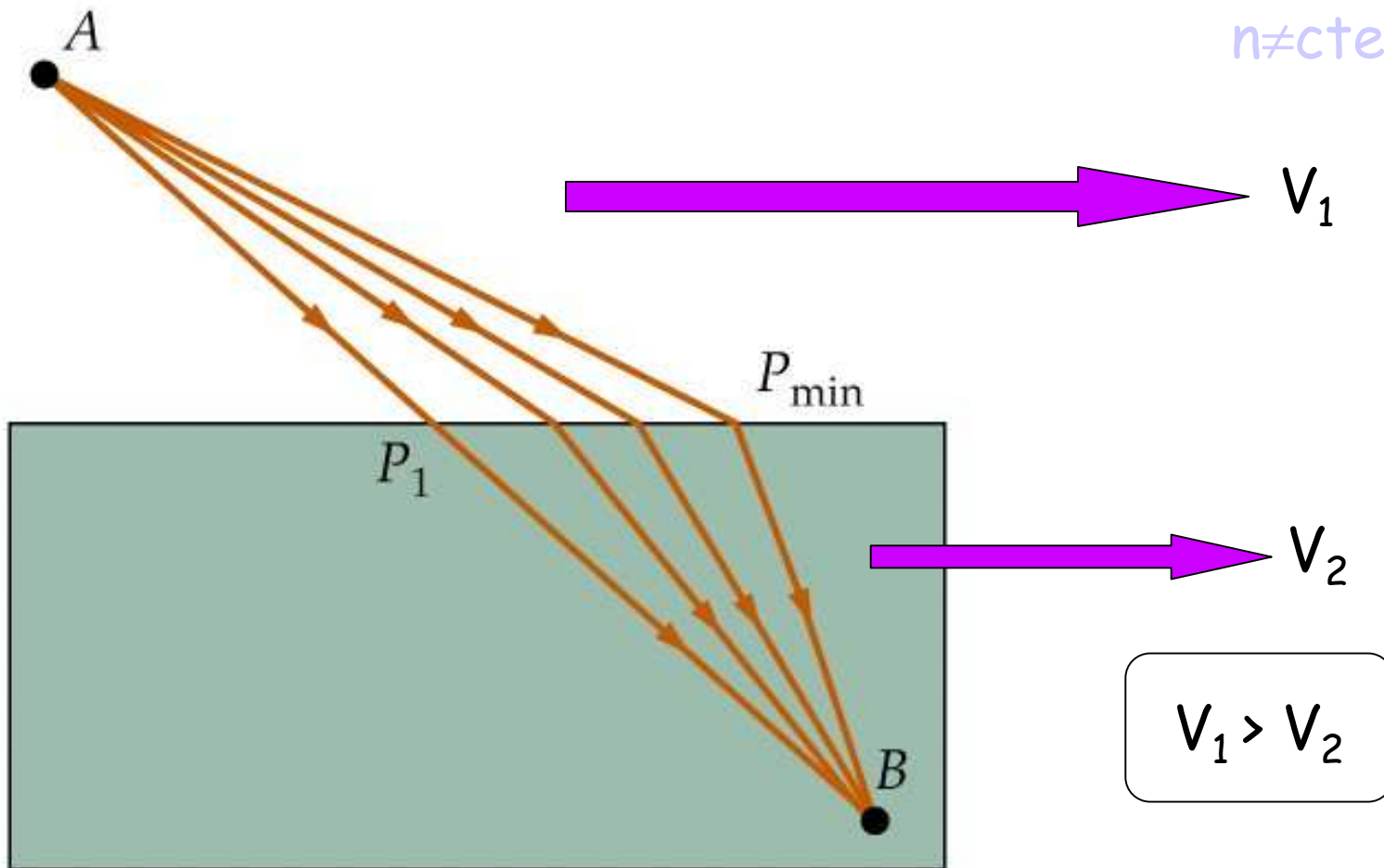
FIGURA 39-17. Reflexión de una onda plana contra un espejo plano, tal como se analiza por medio del principio de Fermat. Un rayo proveniente de A pasa por B luego de reflejarse en P .

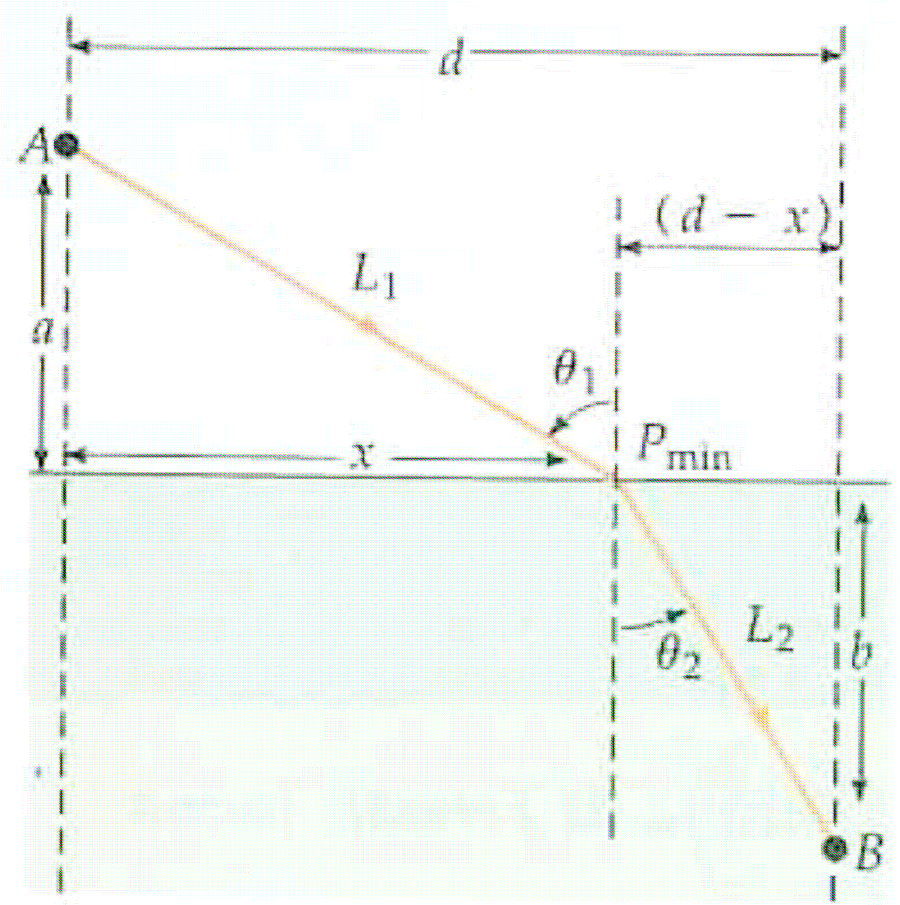
Obtención de la ley de refracción

Ley de la refracción

La luz pase de A a B en el menor tiempo posible

$n \neq \text{cte,}$





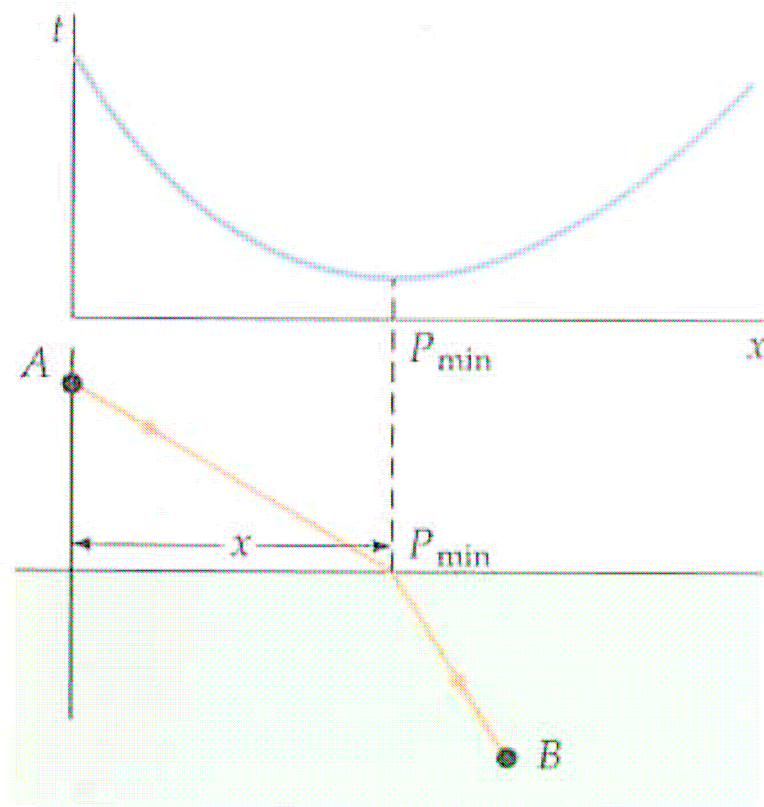


Figura 30-33 Representación gráfica del tiempo que emplea la luz para ir desde A hasta B en función de x , longitud medida a lo largo de la superficie refractante. El tiempo es un mínimo en el punto en que los ángulos de incidencia y de refracción obedecen la ley de Snell.