

21-NATURALEZA DE LA LUZ Y LEYES DE ÓPTICA GEOMÉTRICA



Esta fotografía muestra un arco iris secundario con los colores invertidos. La aparición del arco iris depende de tres fenómenos ópticos: reflexión, refracción y dispersión



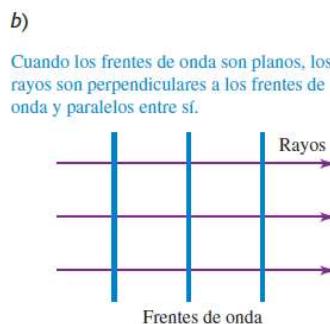
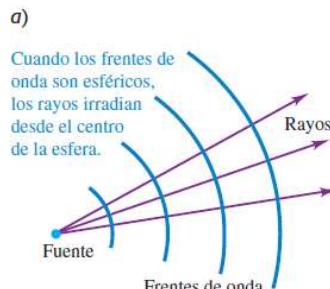
Christiaan Huygens

Físico y astrónomo holandés (1629-1695). Es conocido por sus aportaciones a los campos de la óptica y la dinámica. Para él, la luz consistía en un tipo de movimiento vibratorio que se dispersa y produce la sensación de luz cuando incide en los ojos. Con base en esta teoría, dedujo las leyes de la reflexión y la refracción y explicó el fenómeno de doble refracción.

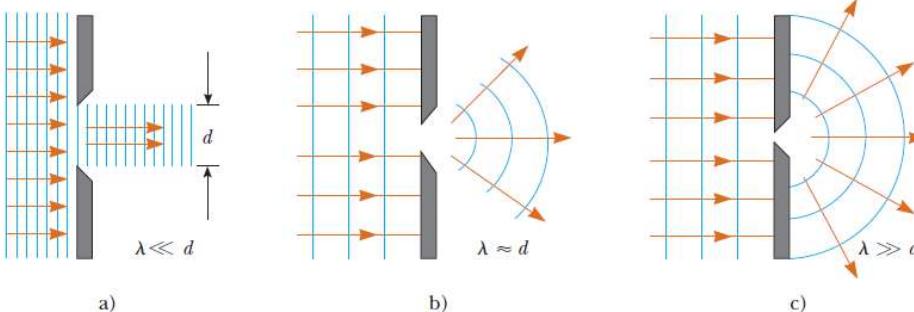
Repaso de lo visto anteriormente

Naturaleza de la luz- Teorías sobre naturaleza de luz: **teoría corpuscular** (Newton, Descartes), **teoría ondulatoria** (Huygens, Hooke).
Actualmente: *naturaleza dual, tanto propiedades ondulatorias* (fenómenos de difracción, polarización) **como corpusculares.**(fenómenos de emisión y absorción).

Velocidad de la luz en el vacío: $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ (valor adoptado como exacto, define el metro) en el vacío para cualquier frecuencia.

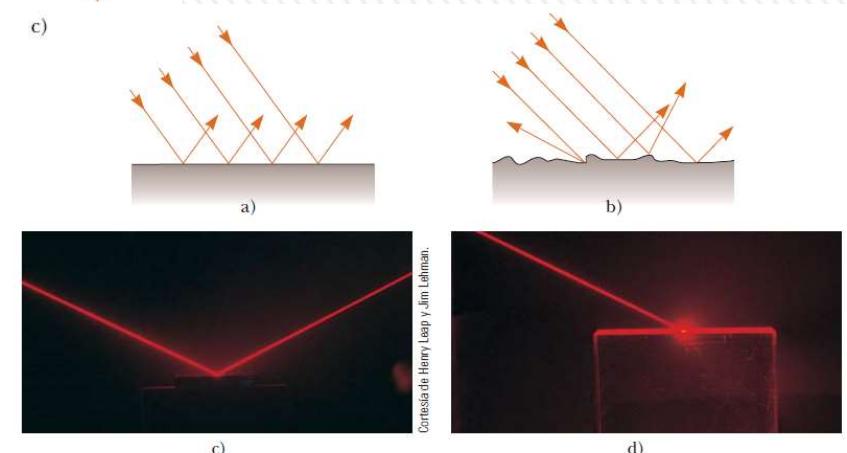


Óptica geométrica: propagación de la luz se desplaza en una dirección fija y en línea recta cuando pasa por un medio uniforme. Aproximación del rayo válida bajo suposición de que $\lambda \ll d$ (tamaño de objetos con que interactúa)



Onda plana de longitud λ incide sobre barrera en la que hay una abertura de diámetro d .

- a) Si $\lambda \ll d$, los rayos siguen en una trayectoria en línea recta, y la aproximación de rayo continua siendo válida. Existen sombras nítidas.
- b) Cuando $\lambda \approx d$, los rayos se extienden después de pasar por la abertura (difracción), sin "respetar" una trayectoria rectilínea..
- c) Cuando $\lambda > d$, la abertura se comporta como fuente puntual que emite ondas esféricas.



Reflexión especular y difusa.

ÍNDICE DE REFRACCIÓN

El **índice de refracción** de un material óptico (también llamado **índice refractivo**), denotado con ***n***, es la razón entre la rapidez *c* de la luz en el vacío y la rapidez *v* de la luz en el material:

$$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$n \equiv \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el medio}} \equiv \frac{c}{v}$$

La rapidez de la luz en cualquier material es *menor que en el vacío* y depende de la frecuencia... disminuye en gral. con la frecuencia
La luz se desplaza a su máxima rapidez en el vacío (*c*) y no depende de la frecuencia.

Índices de refracción

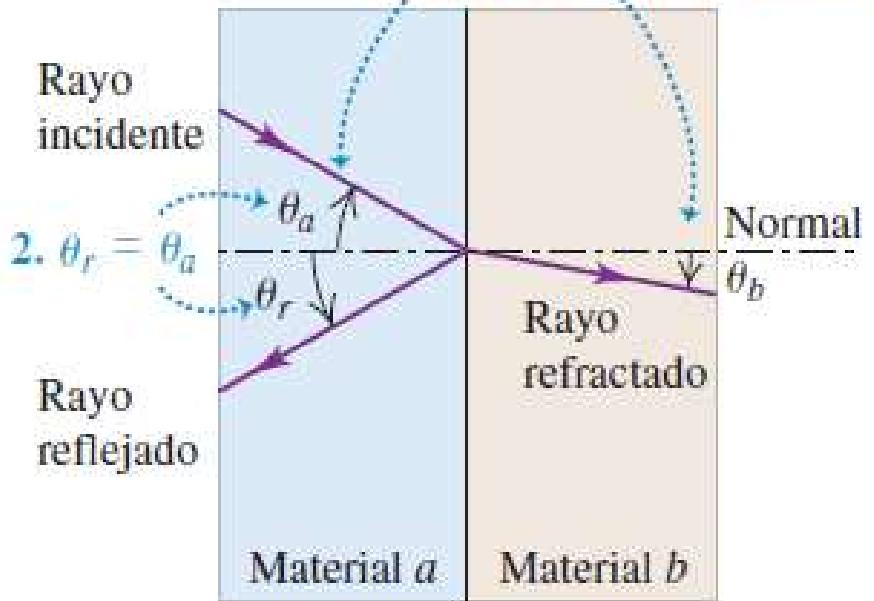
Sustancia	Índice de refracción	Sustancia	Índice de refracción
<i>Sólidos a 20°C</i>			
Circonio cúbico	2.20	Benceno	1.501
Diamante (C)	2.419	Disulfuro de carbono	1.628
Fluorita (CaF_2)	1.434	Tetracloruro de carbono	1.461
Cuarzo fundido (SiO_2)	1.458	Alcohol etílico	1.361
Fosfato de galio	3.50	Glicerina	1.473
Vidrio, sin plomo	1.52	Agua	1.333
Vidrio, con plomo	1.66	<i>Gases a 0°C, 1 atm</i>	
Hielo (H_2O)	1.309	Aire	1.000 293
Poliestireno	1.49	Dióxido de carbono	1.000 45
Cloruro de sodio (NaCl)	1.544		

Nota: Todos los valores son para luz cuya longitud de onda sea de 589 nm en el vacío.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

- Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie, se encuentran en el mismo plano.

Los ángulos θ_a , θ_b y θ_r se miden a partir de la normal.



- Cuando un rayo de luz monocromática cruza la interfase entre dos materiales dados a y b , los ángulos θ_a y θ_b se relacionan con los índices de refracción de a y b por medio de

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a}$$

Leyes de reflexión y refracción

Experimentalmente se probó que:

- Los **rayos incidente, reflejado y refractado**, y la **normal** se encuentran todos en el **mismo plano (plano de incidencia)**, que es perpendicular al plano de la superficie de frontera entre los dos materiales.
- Para la luz monocromática y para un par dado de materiales, a y b , *en lados opuestos de la interfase*, se cumple que:

$$\theta_r = \theta_a \quad \text{Ley de reflexión}$$

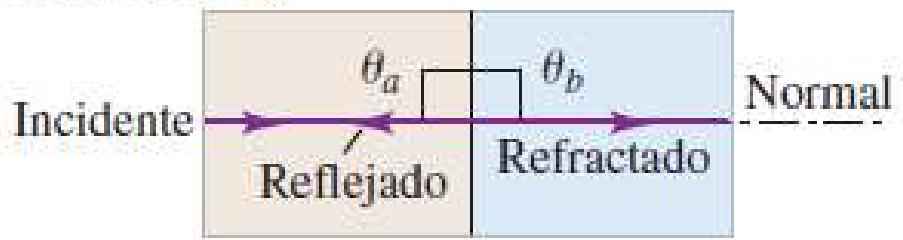
- Para la luz monocromática y para un par dado de materiales, a y b , *en lados opuestos de la interfase*,

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$

Ley de refracción o de Snell

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

c) Un rayo orientado a lo largo de la normal no se desvía, sin importar cuáles sean los materiales.



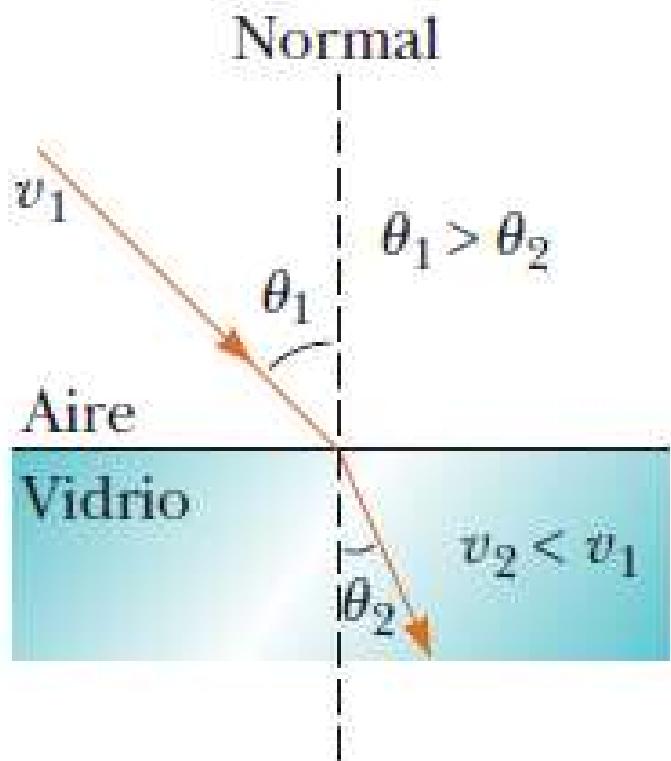
Sin importar cuáles sean los materiales a cada lado de la interfase, en el caso de incidencia *normal* el *rayo transmitido* no se desvía en absoluto.

Cuando un rayo pasa de un material *a* hacia otro material *b* que tiene un mayor índice de refracción ($n_b > n_a$) y, por lo tanto, una menor rapidez de onda, el ángulo θ_b que forma con la normal es más pequeño en el segundo material que el ángulo θ_a en el primero; por consiguiente, el rayo se desvía hacia la normal.

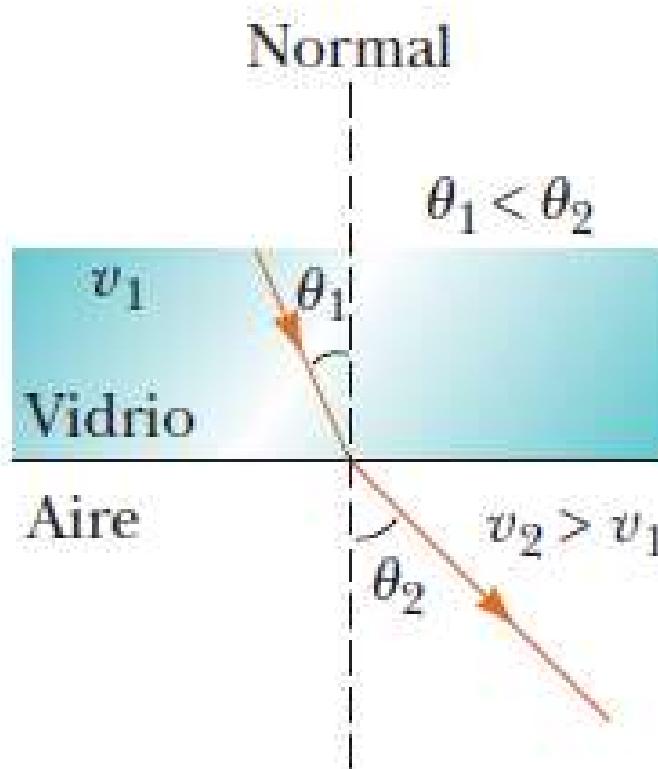
Cuando el segundo material tiene un menor índice de refracción que el primero ($n_b < n_a$) y, por lo tanto, una mayor rapidez de onda, el rayo se desvía alejándose de la normal.

La ley de la refracción explica por qué una regla o una pajilla parcialmente sumergidos parecen estar doblados; los rayos de luz que provienen de un lugar por debajo de la superficie cambian de dirección al pasar por la interfase aire-agua, de manera que los rayos parecen provenir de una posición por arriba de su punto de origen real. Un efecto similar explica la apariencia de los atardeceres.

REFRACCIÓN DE LA LUZ



a)



b)

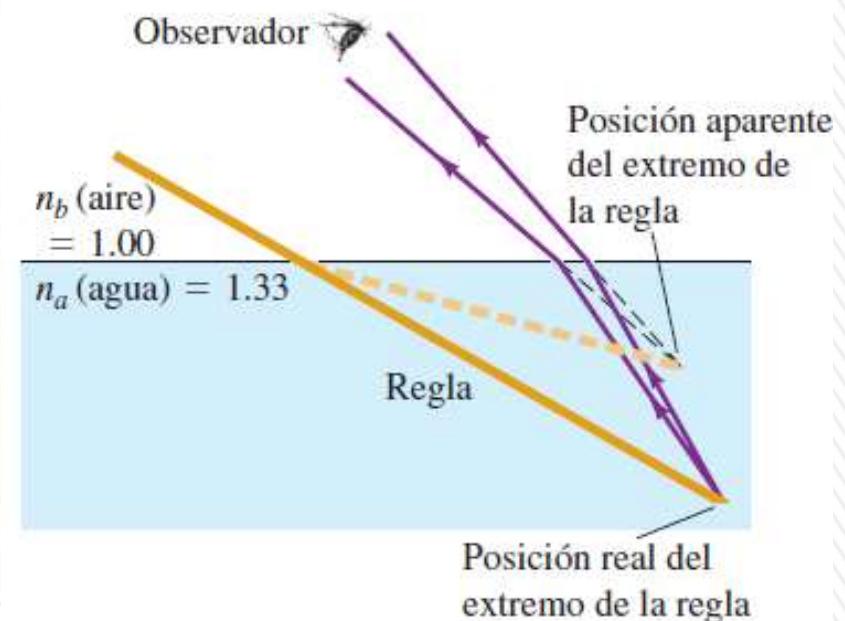
- a) Cuando un haz de luz pasa del aire al vidrio, la luz disminuye su velocidad al entrar a éste y su trayectoria se dobla hacia la normal.
- b) Cuando el haz se mueve del vidrio al aire, la luz aumenta su velocidad al entrar al aire y su trayectoria se dobla alejándose de la normal.

REFRACCIÓN DE LA LUZ

a) Una regla recta sumergida a la mitad en agua



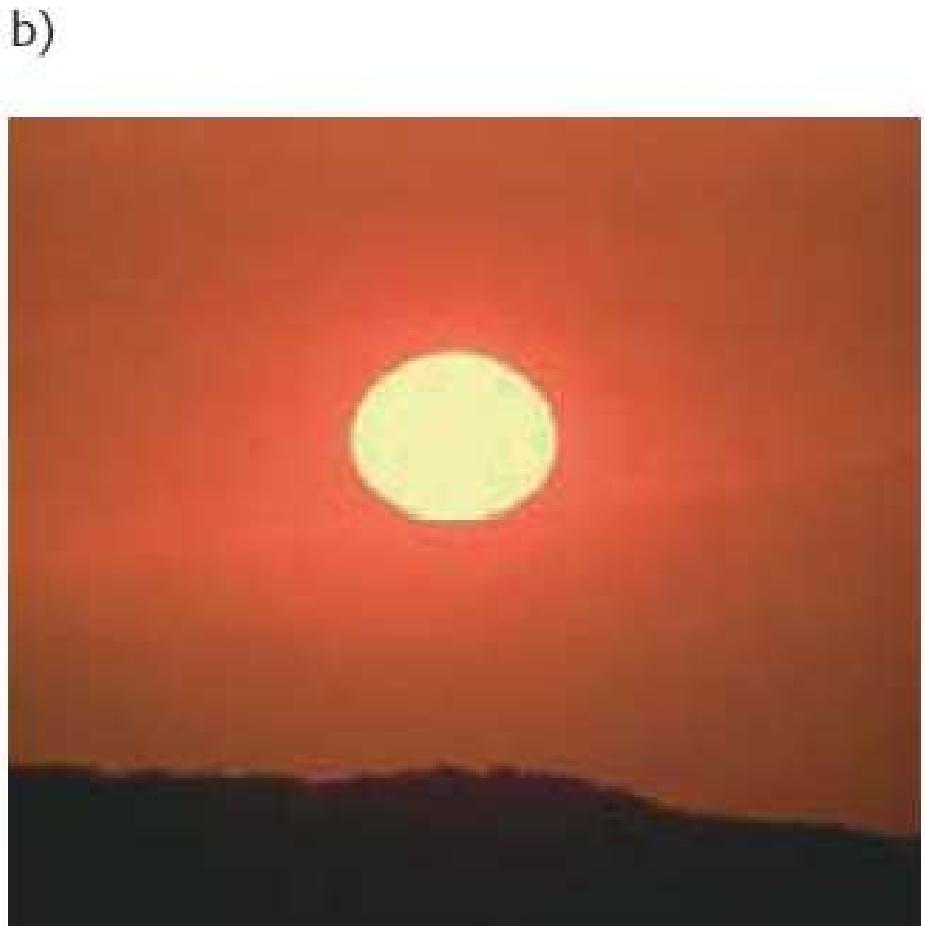
b) ¿Por qué se ve doblada la regla?



a) La regla en realidad es recta, pero parece que se dobla al entrar en la superficie del agua.

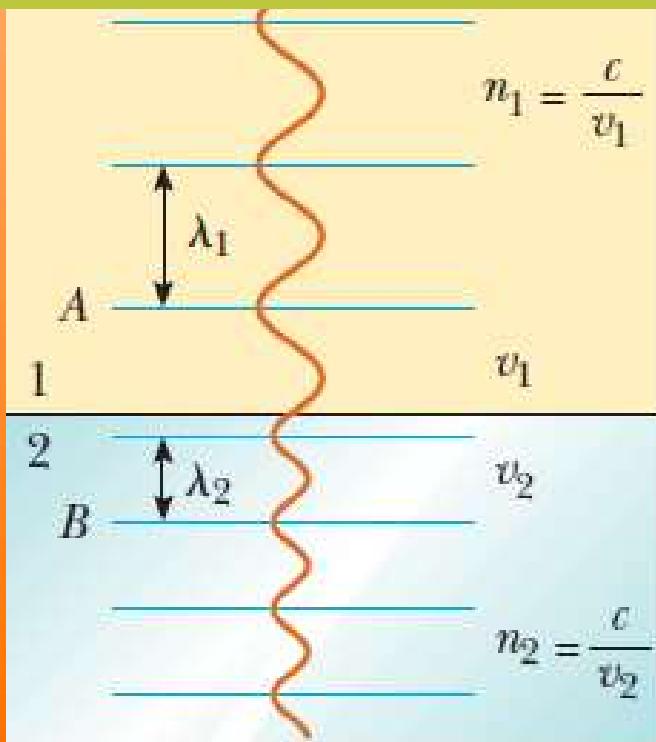
b) Los rayos de luz provenientes de cualquier objeto sumergido se desvían alejándose de la normal cuando salen al aire. Desde el punto de vista de un observador situado afuera de la superficie del agua, el objeto parece estar mucho más cerca de la superficie de lo que en realidad está.

REFRACCIÓN DE LA LUZ



- a) El índice de refracción del aire es ligeramente mayor que 1; por esta razón, los rayos luminosos del Sol cuando se oculta se desvían hacia abajo cuando entran a la atmósfera. (El efecto se exagera en esta figura.)
- b) La luz que proviene del extremo inferior del Sol (la parte que parece estar más cerca del horizonte) sufre una refracción más intensa, pues pasa a través del aire más denso en las capas bajas de la atmósfera. Como resultado, cuando el Sol se oculta, se ve achatado en la dirección vertical.

Índice de refracción y aspectos ondulatorios de la luz



n el índice de refracción, es un número sin dimensiones mayor que 1 porque $v < c$.

n es igual a la unidad para el vacío.

Cuando la luz pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pero sí lo hace su longitud de onda.

El número de ciclos de la onda que llegan por unidad de tiempo debe ser igual al número de ciclos que salen por unidad de tiempo; esto significa que la superficie de frontera no puede crear ni destruir ondas.

La longitud de onda λ , en general, es *diferente en distintos materiales*.

Esto se debe a que en cualquier material, $v = \lambda f$; como f es la misma en cualquier material que en el vacío y v siempre es menor que la rapidez c de la onda en el vacío, λ también se reduce en forma correspondiente.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Un medio se dice que es ópticamente más denso que otro si su índice de refracción es mayor.

REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

PHET: https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_es.html

La luz es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida en una interfase entre dos materiales con distintos índices de refracción.

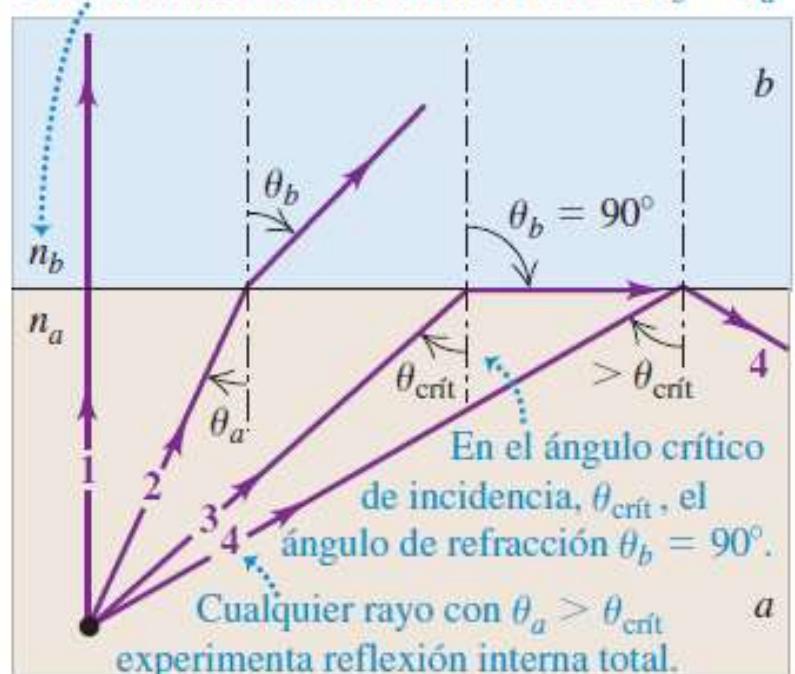
Sin embargo, en ciertas circunstancias, *toda la luz se puede reflejar en la interfase, sin que se transmita nada de ella, aun si el segundo material es transparente.*

Los rayos inciden en la superficie del segundo material *b* con índice n_b , donde $n_a > n_b$. Los materiales *a* y *b* podrían ser agua y aire, respectivamente:

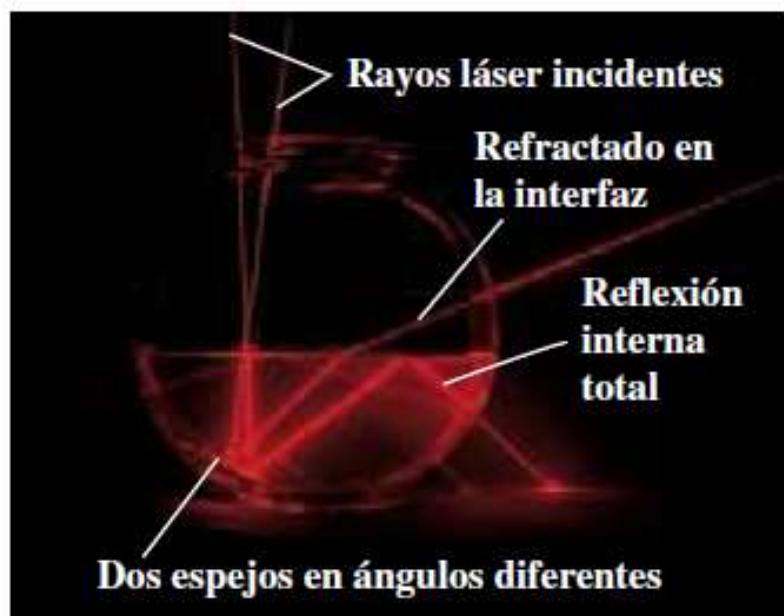
$$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a$$

a) Reflexión interna total

La reflexión interna total ocurre sólo si $n_b < n_a$.



b) Reflexión interna total demostrada con un láser, espejos y agua en una pecera



REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a$ como $n_a / n_b > 1$, $\sin \theta_b > \sin \theta_a$;
el rayo se desvía apartándose de la normal.

Hay un valor de θ_a menor que 90° para el cual $\sin \theta_b = 1$ y $\theta_b = 90^\circ$.

El ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado emerge en forma tangencial a la superficie se llama **ángulo crítico ($\theta_{crít.}$)**.

La intensidad transmitida tiende a cero.

Si el ángulo de incidencia es *mayor que el ángulo crítico, el seno del ángulo de refracción, de acuerdo con la ley de Snell, tendría que ser mayor que la unidad, lo cual es imposible.*

Más allá del ángulo crítico, el rayo no puede pasar hacia el material ubicado en la parte superior: queda atrapado en el material de la parte inferior y se refleja por completo en la frontera de la superficie: reflexión interna total.

Solo ocurre si la incidencia del rayo es desde un material con mayor índice de refracción: $n_b < n_a$ (por ejemplo del agua al aire, pero nunca al revés)

$$\sin \theta_{crít.} = \frac{n_b}{n_a}$$

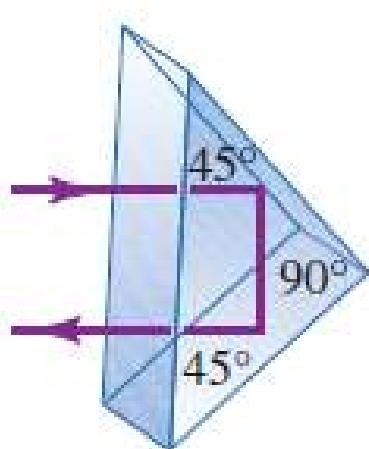
La reflexión interna total ocurrirá si el ángulo de incidencia θ_a es *mayor o igual que $\theta_{crít.}$* .

Aplicaciones de la reflexión interna total

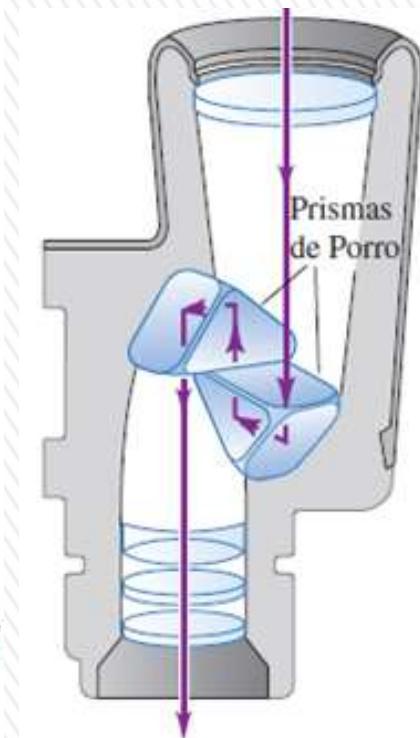
Vidrio de índice de refracción es $n = 1,52$, la luz que se propaga dentro de este vidrio encuentra una interfase vidrio-aire, el ángulo crítico es

$$\operatorname{sen} \theta_{\text{crít}} = \frac{1}{1.52} = 0.658 \quad \theta_{\text{crít}} = 41.1^\circ$$

La luz se reflejará totalmente si incide en la superficie vidrio-aire con un ángulo de 41.1° o mayor. Puesto que el ángulo crítico es un poco menor de 45° , es posible usar un prisma con ángulos de $45^\circ - 45^\circ - 90^\circ$ como superficie totalmente reflectante.

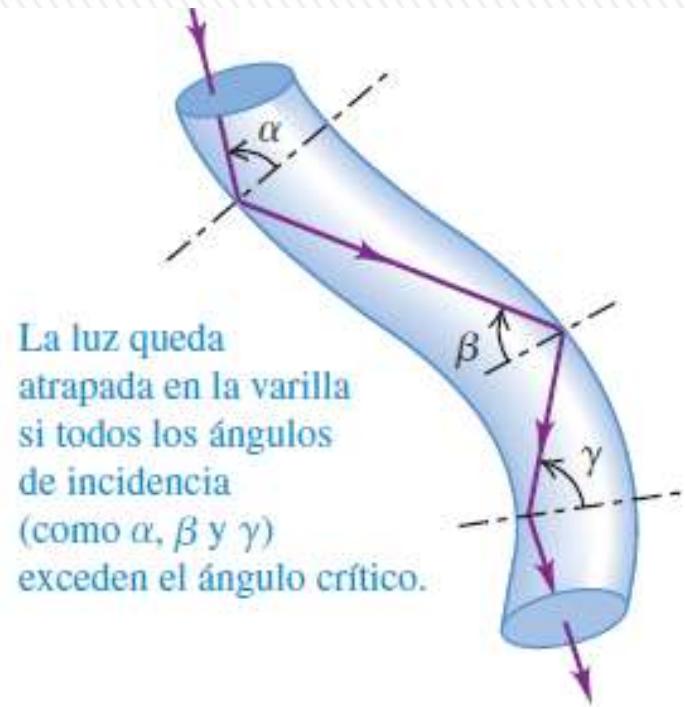


Si el rayo incidente está orientado como se ilustra, la reflexión interna total ocurre en las caras a 45° (porque para una interfase vidrio-aire, $\theta_{\text{crit}} = 41.1$).



Aplicaciones de la reflexión interna total

FIBRAS ÓPTICAS -ENDOSCOPIOS

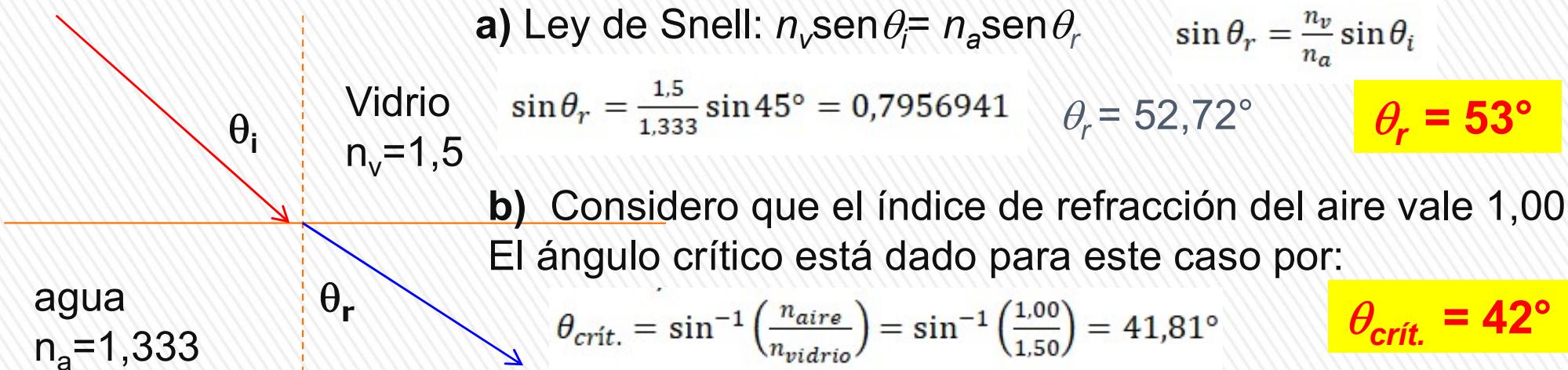


33.16 Transmisión de imágenes por un haz de fibras ópticas.



EJEMPLO: Ejercicio 5.1

- a) Un rayo de luz incide desde el vidrio en una superficie vidrio-agua formando un ángulo de 45° . Hallar el ángulo de refracción si el índice de refracción del vidrio es de 1,5.
- b) ¿Cuál es el ángulo crítico para la reflexión total de la luz que pasa desde un vidrio de índice de refracción 1,5 al aire?
- c) Un rayo de luz incide desde el aire al agua con un ángulo de 30° respecto a la normal. Parte de la luz se refleja y parte se refracta. Hallar los ángulos de ambos rayos. ¿Qué cambiaría si el rayo incidiera con el mismo ángulo pero desde el agua al aire?



c) Por la ley de reflexión, el ángulo reflejado es igual al incidente $\theta_{reflejado} = 30^\circ$

$\theta_{reflejado} = 30^\circ$ Ley de Snell: $n_{aire} \sin \theta_i = n_{agua} \sin \theta_r$

$$\sin \theta_r = \frac{n_{aire}}{n_{agua}} \sin \theta_i = \frac{1,00}{1,33} \sin 30^\circ = 0,3750938$$

$$\theta_r = 22,03$$
 $\theta_r = 22^\circ$

Si la incidencia es desde el agua al aire tendríamos que:

$$\sin \theta_r = \frac{n_{agua}}{n_{aire}} \sin \theta_i = \frac{1,00}{1,33} \sin 30^\circ = 0,6665$$

$$\theta_r = 41,80^\circ$$
 $\theta_r = 42^\circ$

DISPERSIÓN

Luz blanca superposición de ondas con λ que se extienden a través de todo el espectro visible (400 a 700 nm) (ó incluso 380-780 nm).

La rapidez de la luz en el vacío es la misma para todas las λ , pero en la materia varía con λ .
Índice de refracción (n) de un material depende de λ : **dispersión.**

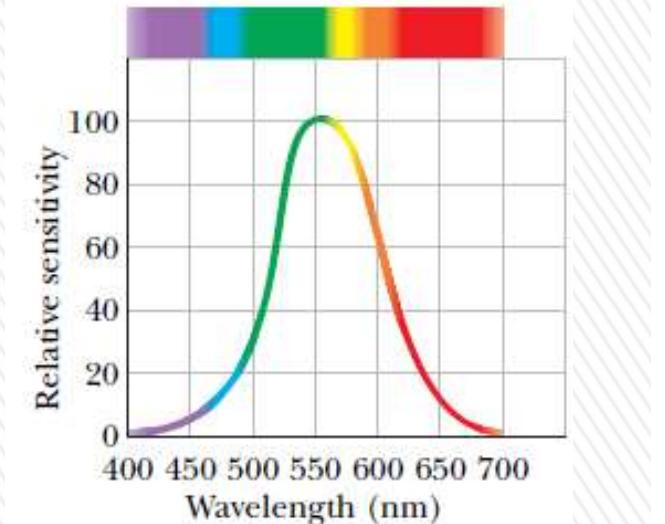
Variación del índice de refracción n con λ .

En gral. n disminuye al aumentar λ .

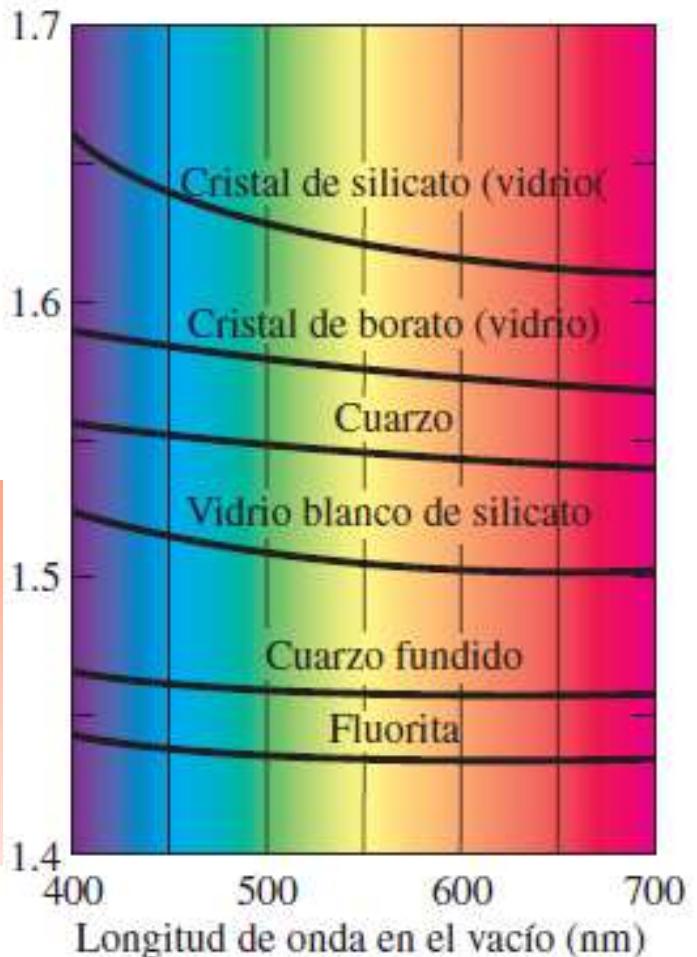
Como n depende de λ , por la ley de Snell luces de diferentes λ se refractan a diferentes ángulos cuando inciden sobre un material.

Cuando un haz de *luz blanca* (*combinación de todas las longitudes de onda visibles*) incide en un prisma los rayos que emergen se dispersan en una serie de colores conocida como **espectro visible**.

Estos colores, en orden de longitud de onda decreciente son rojo, naranja, amarillo, verde, cian, azul y violeta.



Índice de refracción (n)



DISPERSIÓN

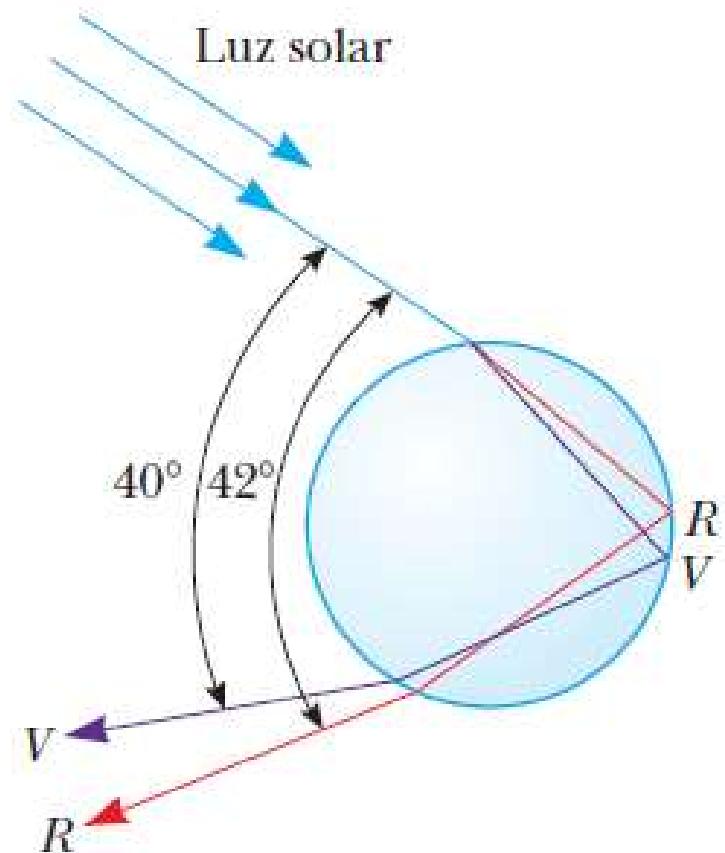


rojo	618-780 nm
anaranjado	581-618 nm
amarillo	570-581 nm
verde	497-570 nm
cian	476-497 nm
azul	427-476 nm
violeta	380-427 nm

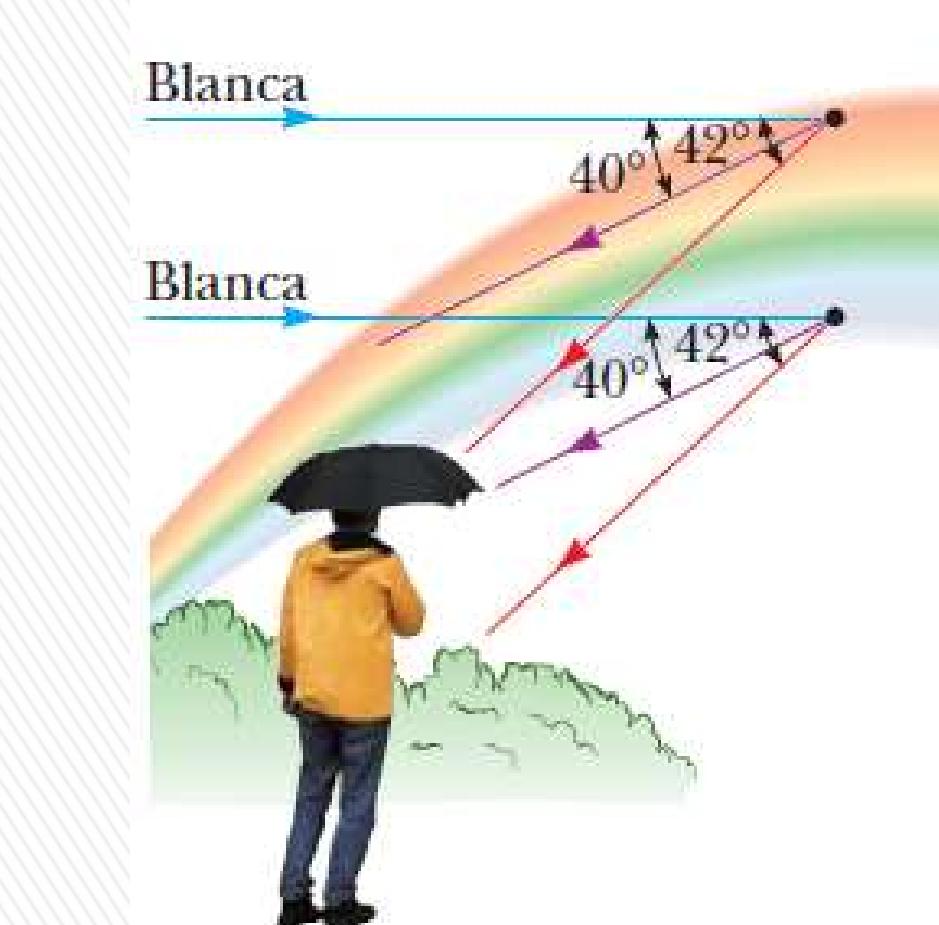
Dispersión de la luz a través de un prisma. La banda de colores se llama espectro.

No hay límites exactos en el espectro visible: un típico ojo humano responderá a longitudes de onda de 390 a 750 nm aunque algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 380 hasta 780 nm.

DISPERSIÓN- Formación arco iris primario



Trayectoria de luz solar a través de una gota esférica de lluvia. La luz que sigue esta trayectoria contribuye al arco iris visible.



Formación de un arco iris visto por un observador situado con el Sol a su espalda.

DISPERSIÓN- Formación arco iris primario

La dispersión de luz en un espectro se comprueba en la formación de un arco iris, el cual se ve cuando el observador se sitúa entre el Sol y una zona con lluvia.

Un rayo de luz de sol (**luz blanca**) incide por arriba en una gota de agua en la atmósfera y es refractado y reflejado de la siguiente manera: primero es **refractado en la superficie frontal** de la gota, ahí **la luz violeta tiene la mayor desviación** y la luz roja la menor. En la **superficie posterior** de la gota, **la luz se refleja** y regresa a la superficie frontal. En la **superficie frontal** experimentan **una nueva refracción** cuando pasa del agua al aire.

Los rayos dejan la gota tal que el **ángulo entre la luz blanca incidente y el más intenso rayo violeta de retorno es de 40°** y el **ángulo entre la luz blanca incidente y el rayo rojo más intenso de retorno es de 42°** . Esta pequeña diferencia angular entre los rayos de retorno hace posible que se vea un arco de colores.

Ahora suponga que un observador mira un arco iris, como se muestra en la otra figura. Si se observa una gota de lluvia en el cielo, **la luz roja más intensa que retorna de la gota llega al observador porque es la que más se desvía y la luz violeta más intensa pasa sobre el observador porque es la que menos se desvía.**

En consecuencia, **el observador ve esta gota de color rojo.**

Del mismo modo, **una gota más baja en el cielo dirigiría la más intensa luz violeta hacia el observador y se vería de color violeta.** (

La luz roja más intensa de esta gota pasaría por debajo de los ojos del observador y no sería visible.) La más intensa luz de otros colores del espectro llegaría al observador desde gotas de lluvia que estuvieran entre estas dos posiciones extremas.

Formación de arcos iris primario y secundario

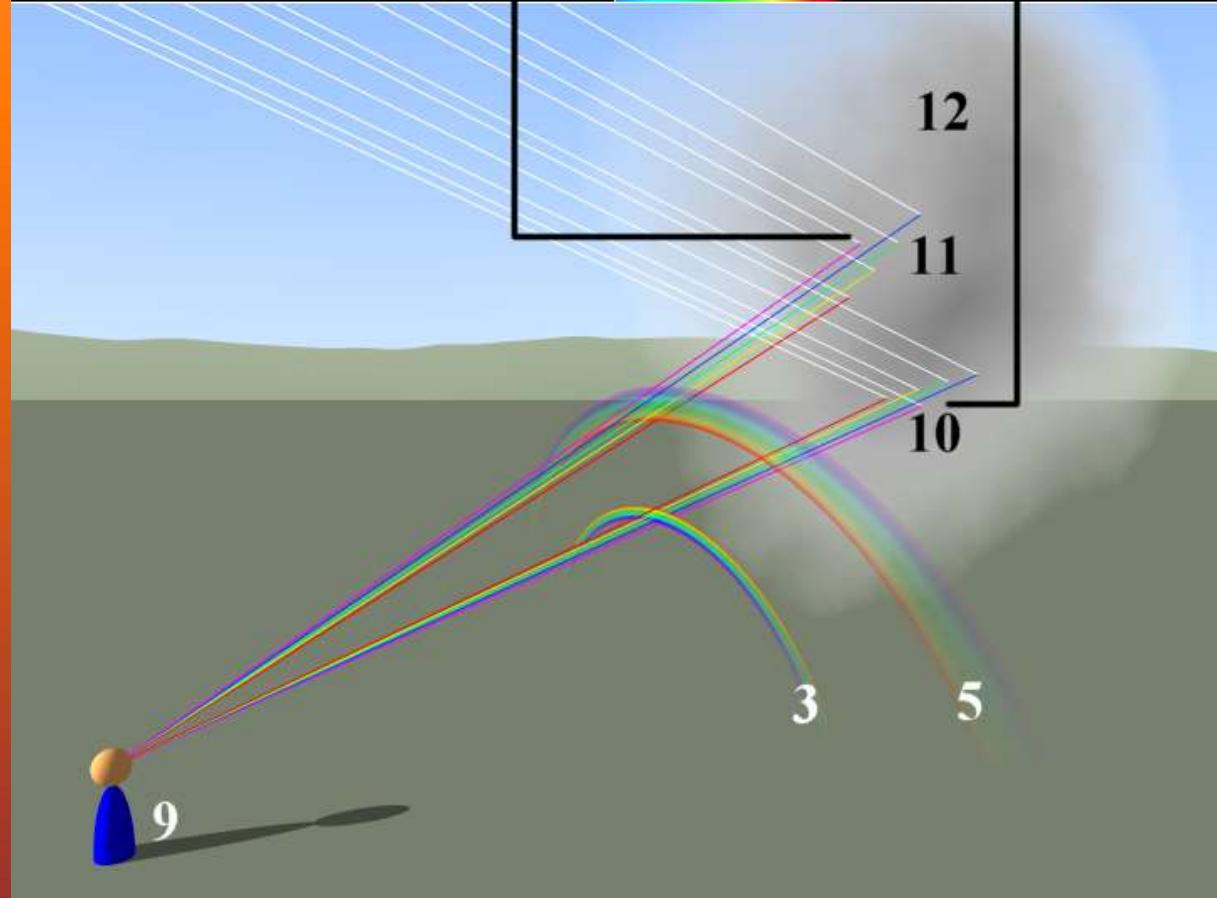
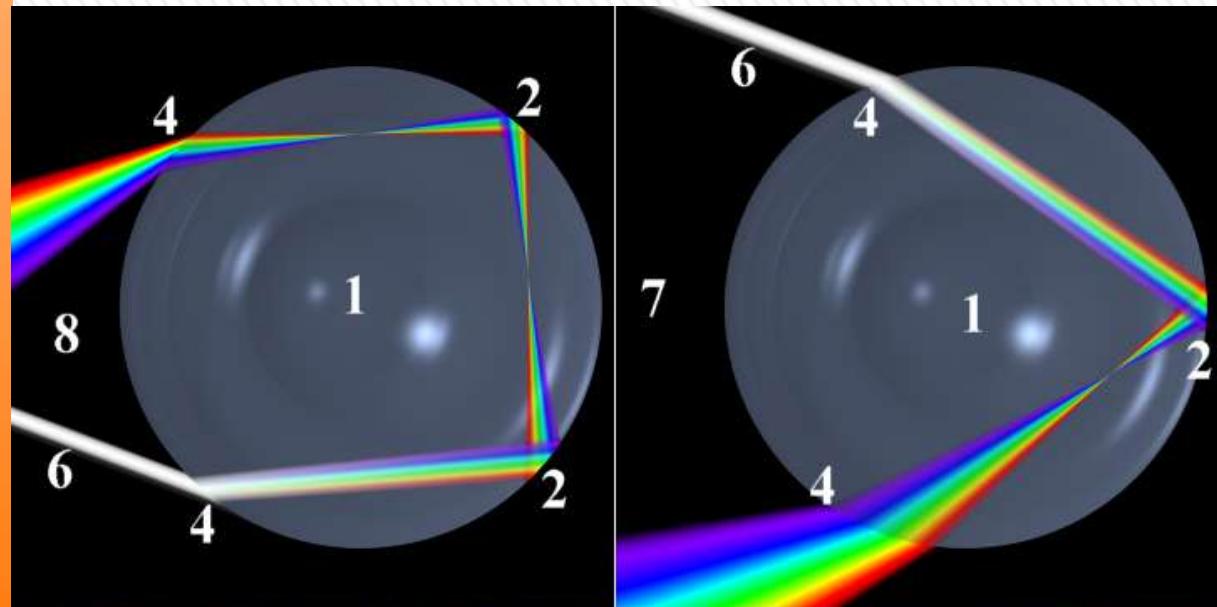


Diagrama que muestra como se forman los aco iris primarios y secundarios debido a la descomposición de la luz blanca en gotitas esféricas:

1. Gotitas esféricas
2. Lugares donde ocurre el reflejo interno de la luz
3. Arco iris primario
4. Lugares donde ocurre la refracción de la luz.
5. Arco iris secundario
6. Rayos entrantes de luz blanca
7. **Recorrido de la luz que forma el arco iris primario**
8. **Recorrido de la luz que forma el arco iris secundario**
9. Observador
10. Región que forma el arco iris primario
11. Región que forma el arco iris secundario
12. Zona en la atmósfera llena de incontables diminutas gotitas esféricas

EJEMPLO: Ejercicio 5.5

Haga este sencillo experimento por su cuenta.

Tome dos tazas opacas, coloque una moneda en el fondo de cada taza cerca del borde, y llene una taza con agua.

A continuación, vea las tazas desde un lado en algún ángulo de modo que la moneda en el agua sea apenas visible, como se muestra en la figura de la izquierda.

Tenga en cuenta que la moneda en aire no es visible, como se muestra a la derecha en la figura.



EJEMPLO: Ejercicio 5.7.a

Prismas a) Luz blanca entra en un prisma de vidrio de sección triangular. Incide perpendicularmente a la cara delantera y es refractada en la cara trasera. El ángulo entre las caras es de $30,0^\circ$. Si el índice de refracción del vidrio es $n_A = 1,525$ para la luz azul ($\lambda = 450 \text{ nm}$) y $n_R = 1,512$ para luz roja ($\lambda = 650 \text{ nm}$) ¿cuál es el ángulo entre la luz roja y la luz azul después de pasar por el prisma?

Por la ley de Snell: $n_{\text{vidrio}} \sin \theta_1 = n_{\text{aire}} \sin \theta_2 = \sin \theta_2$
Para todos los colores, el ángulo de incidencia desde el vidrio vale $\theta_1 = 30,0^\circ$

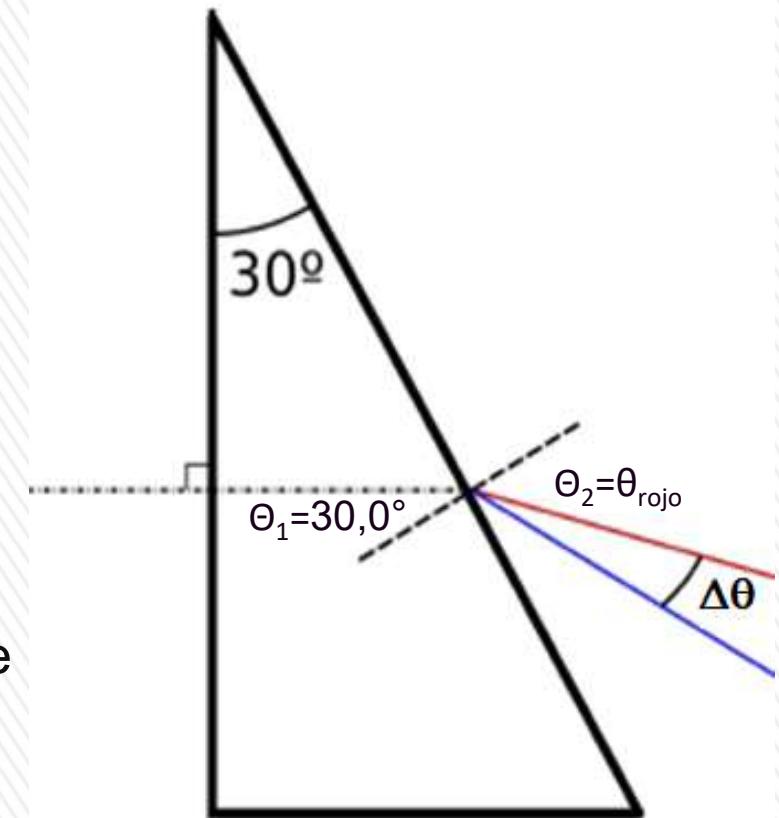
Para c/u de los colores se cumple:

$$\theta_{\text{rojo}} = \sin^{-1}(n_{\text{rojo}} \sin \theta_1) = \sin^{-1}(n_{\text{rojo}} \sin 30,0^\circ) = \sin^{-1}(0,500 \times n_{\text{rojo}})$$

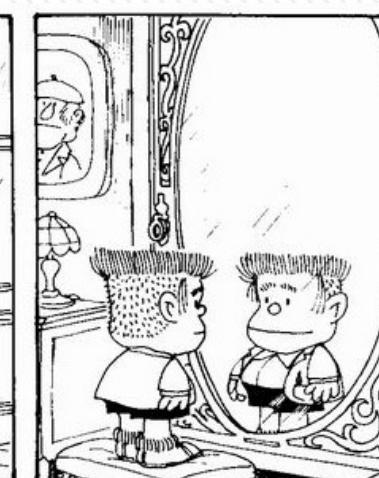
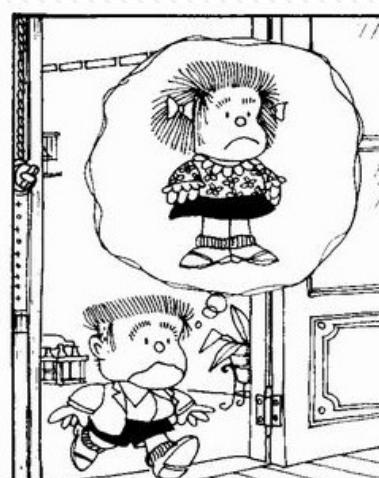
$$\theta_{\text{rojo}} = \sin^{-1}(0,500 \times 1,512) = \sin^{-1}(0,500 \times 1,512) = 49,1128^\circ$$

$$\theta_{\text{azul}} = \sin^{-1}(0,500 \times n_{\text{azul}}) = \sin^{-1}(0,500 \times 1,525) = 49,6851^\circ$$

$\Delta\theta = 0,572^\circ$



21-FORMACIÓN DE IMÁGENES



ÓPTICA GEOMÉTRICA

El reflejo en un espejo, o la visión de un objeto a través de lentes son ejemplos de **ímagenes**.

En cada caso, el **objeto** que miramos parece estar en un lugar diferente de su posición real, los rayos de luz provenientes de un punto del objeto se desvían por **reflexión o refracción** (o una combinación de ambas), de tal forma que convergen hacia un punto denominado **punto de imagen**, o parecen divergir con respecto a éste.

El papel fundamental que desempeña la geometría en nuestro análisis es la razón por la que se da el nombre de **óptica geométrica** al estudio de la formación de imágenes mediante rayos luminosos.

En óptica **objeto** es todo aquello desde donde radian rayos de luz, ya sea emitida por el objeto que es luminoso, o reflejada de una fuente distinta.



Reflexión en una superficie plana

Reflexión especular en espejo plano: todos los rayos que inciden en la superficie se reflejan a un ángulo igual al ángulo de incidencia.

Una vez que los rayos se han reflejado, su dirección es la misma que si hubieran provenido del punto P' .

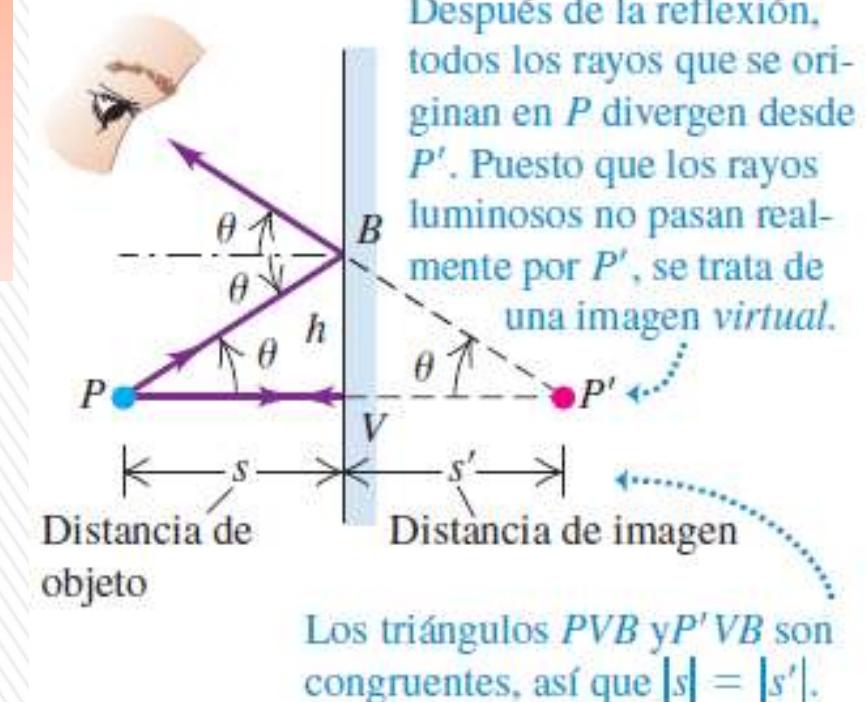
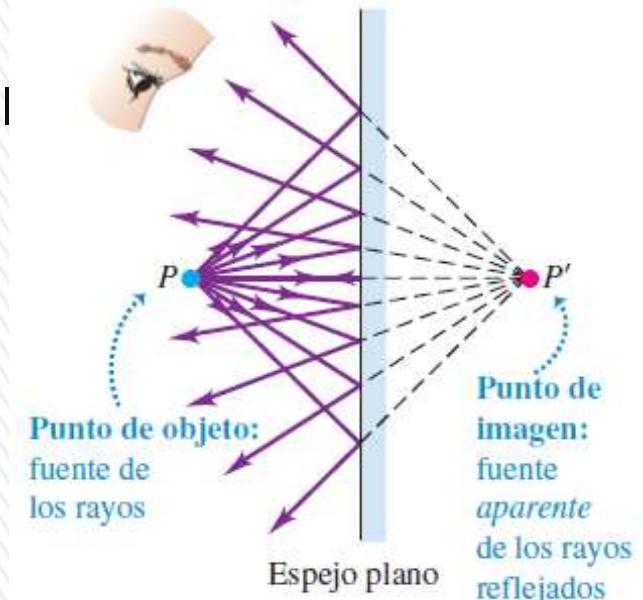
Un observador que ve únicamente los rayos reflejados, y que no sabe que está viendo un reflejo, piensa que el origen de los rayos se encuentra en el punto P' (**punto imagen**).

Imagen virtual: es la que se ve en un espejo plano, por ella la luz no pasa, no se puede enfocar en una pantalla, para verla se debe mirar en el interior del espejo. Las imágenes virtuales son verticales derechas (no invertidas).

Imagen real- La luz pasa por la imagen. Se puede enfocar sobre una pantalla y siempre está invertida.

La línea entre P y P' es perpendicular al espejo. Los dos triángulos PVB y $P'VB$ son congruentes; por lo tanto, P y P' están a la misma distancia del espejo, y s y s' tienen igual magnitud.

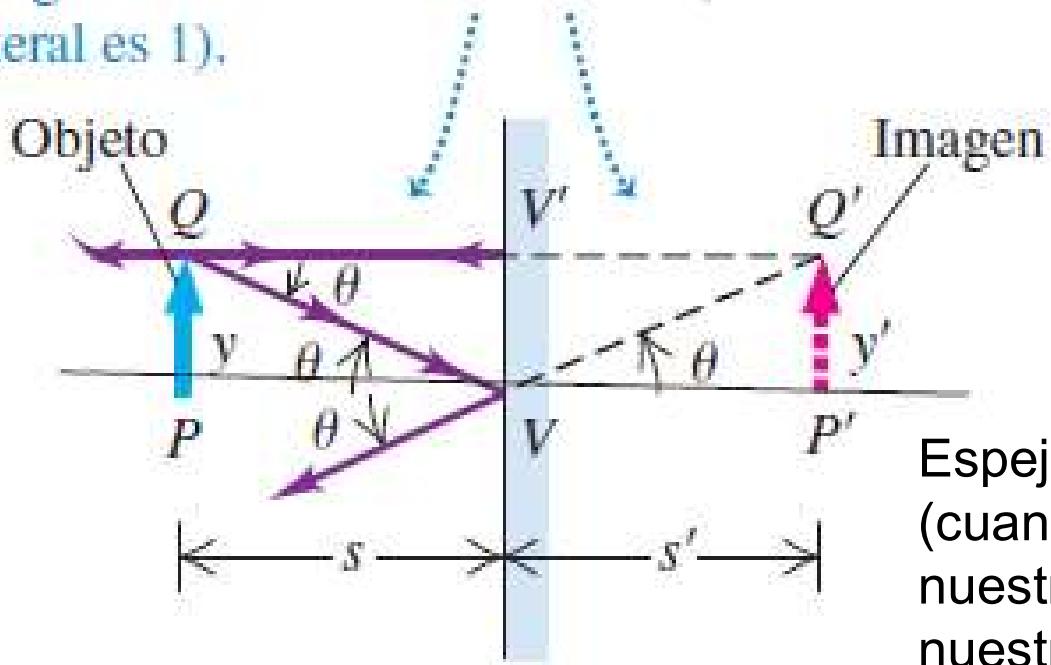
El punto de imagen P' está situado exactamente en posición opuesta al punto del objeto P .



Reflexión y refracción en una superficie plana

Imagen de un objeto extenso: espejo plano

Para un espejo plano, PQV y $P'Q'V$ son congruentes, así que $y = y'$ y el objeto y la imagen tienen el mismo tamaño (el aumento lateral es 1).



Los triángulos QPV y $Q'P'V'$ son congruentes, se concluye que: $y=y'$. Cociente entre altura de imagen (y') y la altura objeto (y) en cualquier situación de formación de imágenes es el **aumento lateral m**:

$$m = \frac{y'}{y} \quad (\text{aumento lateral})$$

Espejo plano, el aumento lateral m es 1 (cuando nos miramos en un espejo plano, nuestra imagen es del mismo tamaño que nuestro cuerpo)

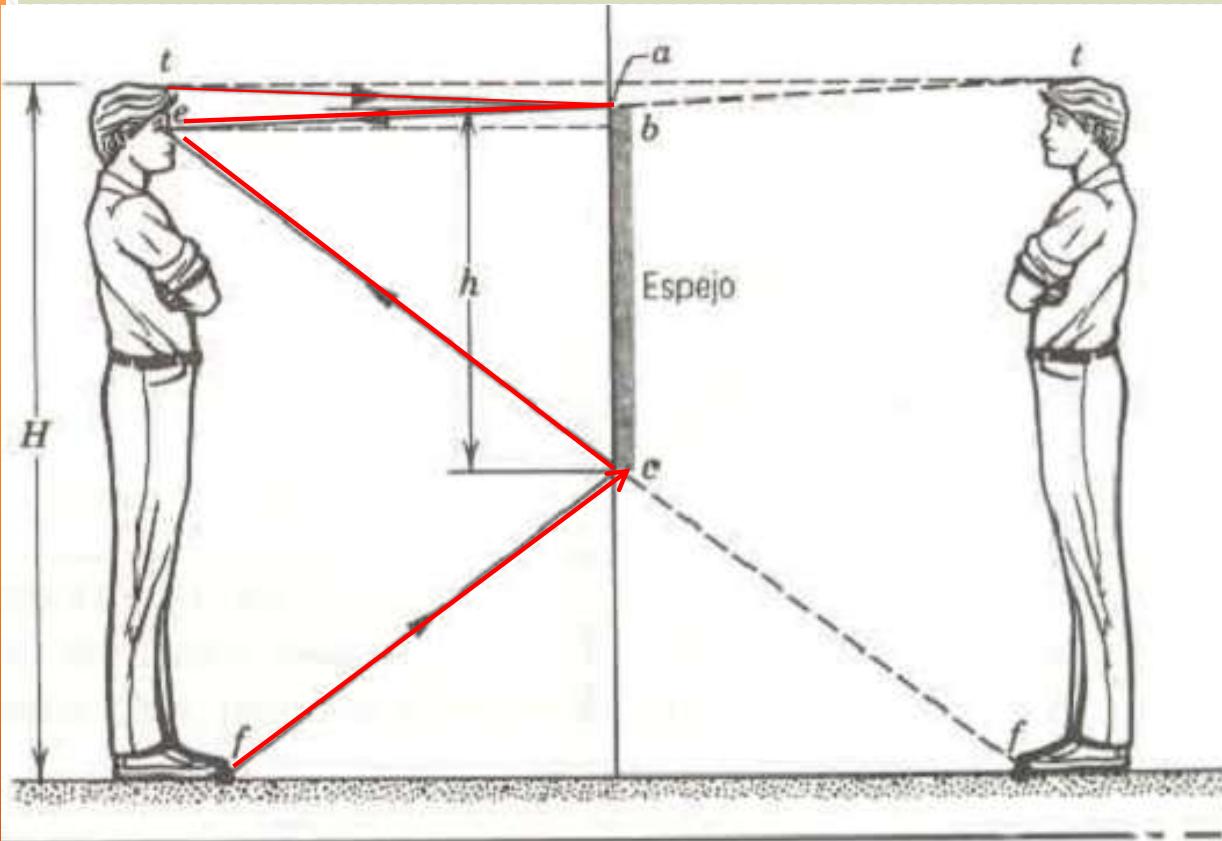
La imagen es **derecha**, si y e y' tienen el mismo signo, y $m > 0$.

Si la imagen estuviera invertida se dice que es una imagen **invertida**, y e y' tienen signos opuestos, y el aumento lateral m es negativo.

Un espejo plano invierte las imágenes izquierda y derecha, pero no de arriba y de abajo: es una **inversión de lateralidad**.

EJEMPLO: ejercicio 5.8.b)

= ¿Qué altura mínima debe tener un espejo para que una persona que mide 1,70 m, pueda verse reflejada de cuerpo entero en el mismo?



Para que se vea toda su altura, un rayo de luz (tae) debe salir de la parte superior de su cabeza, reflejarse en a y entrar a sus ojos.

Otro rayo (fce) debe salir de sus pies, reflejarse en c y entrar a sus ojos.

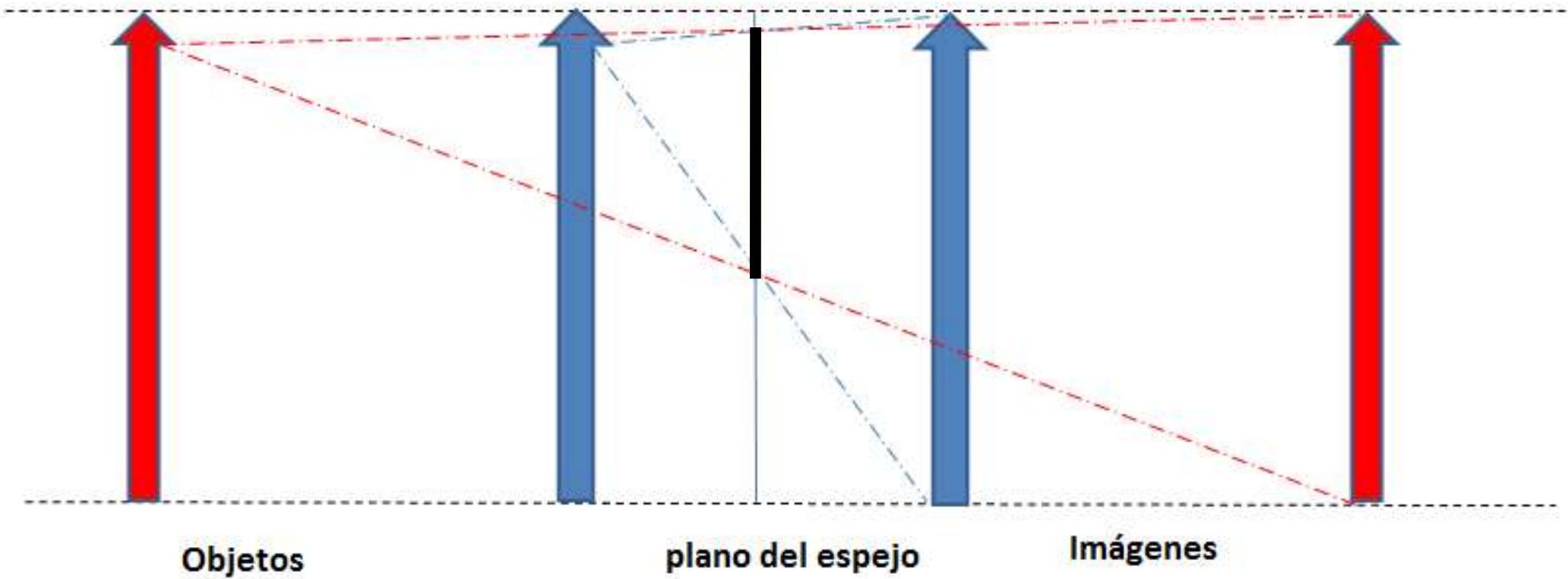
La persona verá una imagen de toda su altura si longitud del espejo es ac por lo menos.
De la geometría se ve que:

$$ab = \frac{1}{2}te \quad bc = \frac{1}{2}ef$$

$h = H/2 = 1,70 /2 = 0,85 \text{ m}$
y no depende de la posición!!!!

$$ac = ab + bc = \frac{1}{2}te + \frac{1}{2}ef = \frac{1}{2}(te + ef) = \frac{1}{2}H$$

= ¿Qué altura mínima debe tener un espejo para que una persona que mide 1,70 m, pueda verse reflejada de cuerpo entero en el mismo?



Reflexión en una superficie esférica

Imagen de un objeto puntual: Espejo esférico cóncavo

a) Construcción para encontrar la posición P' de la imagen formada por un espejo esférico cóncavo

Para un espejo esférico,
 $\alpha + \beta = 2\phi$.

Objeto
puntual

Centro de
curvatura

s y s' son
positivas.

s s'

El rayo reflejado interseca el eje en P' , que es, entonces, la imagen de P .

Como los rayos reflejados se intersecan realmente en P' , y luego divergen a partir de P' , como si se hubieran originado en ese punto: **P' es una imagen real**.

Podría colocar realmente una pantalla o trozo de película y aparecería la imagen...

Espejo esférico con radio de curvatura R , con su lado cóncavo hacia luz incidente.

C - centro de curvatura de la superficie

V- vértice del espejo

Recta CV: eje óptico.

P: punto de objeto (sobre eje óptico)

Rayo PV: pasa por C, incide de forma normal en el espejo y se refleja sobre sí mismo.

Rayo PB, a un ángulo α con respecto al eje, incide en el espejo en B, donde los ángulos de incidencia y de reflexión son θ .

Reflexión en una superficie esférica

Reglas de signos:

Para todas las superficies reflectantes y refractivas tanto planas como esféricas.

1-**Para distancia de objeto (s):** $s > 0$ cuando el objeto está del lado entrante de la luz a la superficie (**objeto real**); $s < 0$ en caso contrario.

2. **Para la distancia de imagen (s'):** $s' > 0$ cuando la imagen está del lado que la luz sale de la superficie (**imagen real**); $s' < 0$ en caso contrario.

3. **Radio de curvatura de una superficie esférica (R):** $R > 0$ cuando el centro de curvatura está del lado saliente de la luz de la superficie; $R < 0$ en caso contrario.

4. **Regla del aumento lateral (m):** $m > 0$ cuando la imagen es derecha; $m < 0$ cuando es invertida.

Espejo plano: $s = -s'$

Espejos esféricos: relación entre distancias de objeto (s) y de imagen (s')

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

Demostración en presentación
05.2 en Teórico del EVA

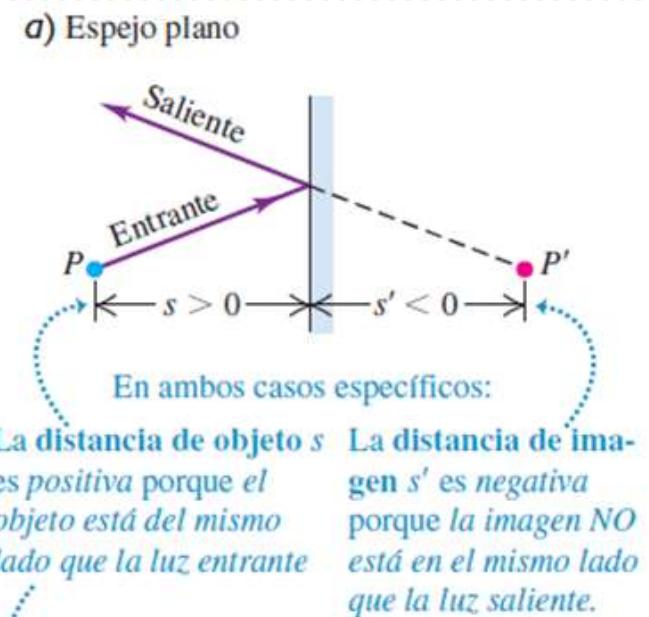
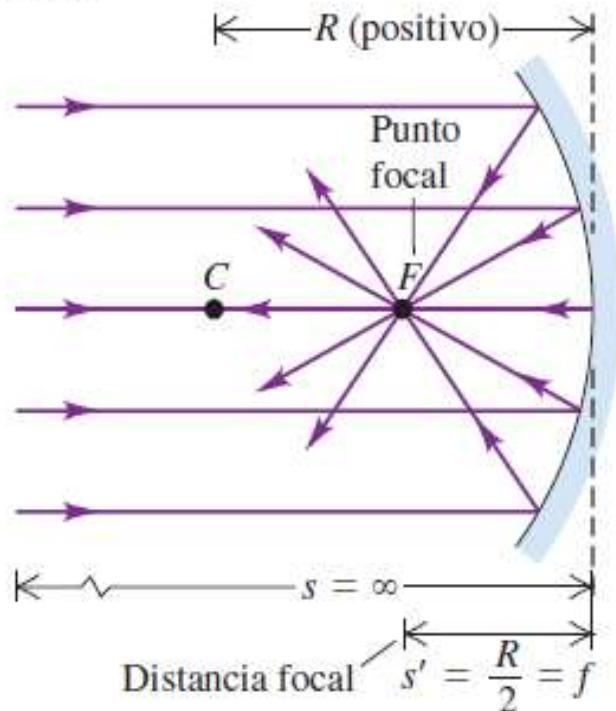


Imagen de un objeto: espejo esférico

a) Todos los rayos paralelos incidentes en un espejo esférico se reflejan a través del punto focal.



$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

Los rayos que forman ángulos suficientemente pequeños con el eje, casi paralelos al eje y próximos a él, se llaman **rayos paraxiales**.

Debido a que todos estos rayos reflejados convergen en el punto de imagen, los espejos cóncavos también se conocen como **espejos convergentes**.

Si el punto del objeto P está muy lejos del espejo esférico ($s = \infty$), los rayos entrantes son paralelos.

Para este caso:

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R} \Rightarrow s' = \frac{R}{2}$$

El haz de rayos paralelos incidentes converge, después de reflejarse en el espejo, en un punto F situado a una distancia $R/2$ del vértice del espejo.

El punto F donde los rayos paralelos incidentes convergen se llama **punto focal** o **foco** y la distancia del vértice al punto focal, que se indica con f , recibe el nombre de **distancia focal**:
 f se relaciona con el radio de curvatura R : $f = R/2$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

Imagen de un objeto extenso: Espejo esférico

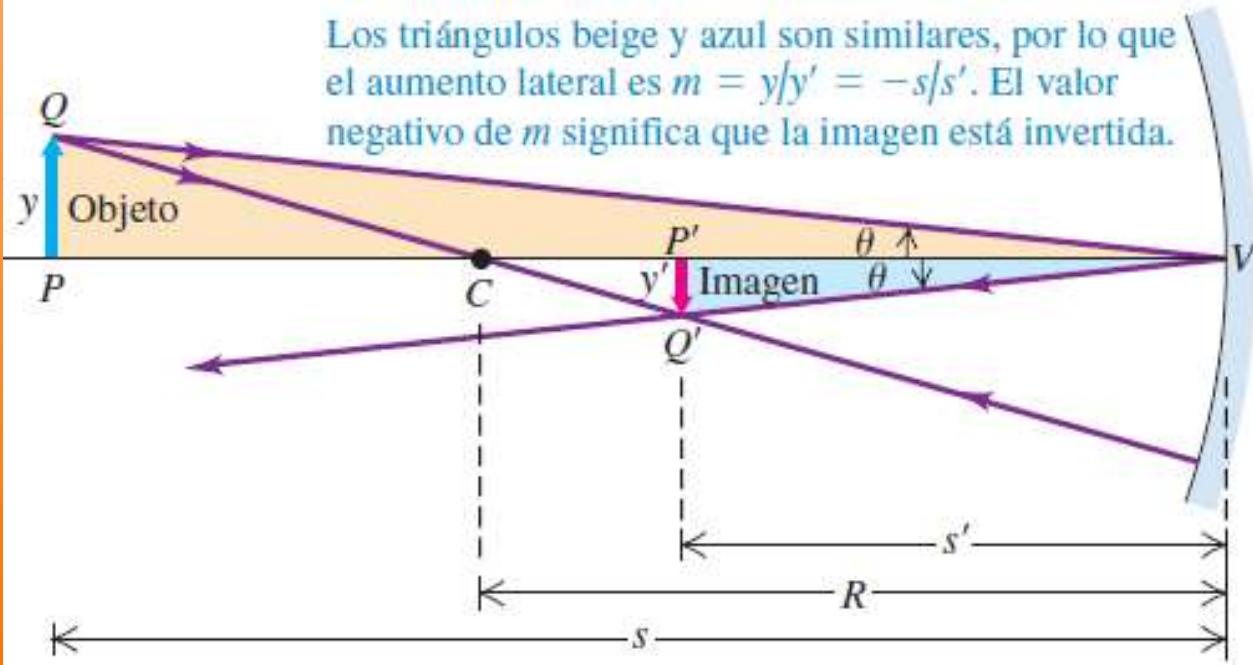


Imagen de P en P'

Imagen y' está invertida.

Triángulos PQV y P'Q'V son semejantes.

Por lo tanto: $m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$

Si $m > 0$, la imagen es derecha en comparación con el objeto;
si $m < 0$ la imagen está invertida con respecto al objeto,

Hemos analizado el caso en que $s \geq f$, y visto que la **imagen es real e invertida**. Si $s < f$ la imagen resultante es **virtual** (la imagen está en el lado opuesto del espejo con respecto al objeto), **derecha y más grande que el objeto**.

Los espejos que se utilizan para aplicar maquillaje son espejos cóncavos; al usarlo, la distancia del rostro al espejo es menor que la distancia focal ($s < f$), y se observa una imagen derecha ampliada.

Se pueden verificar esto aplicando:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$