

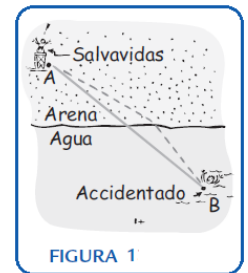
## Refracción de la luz

**Objetivo:** Comprender la refracción de la luz y los fenómenos ópticos que genera.

**Nivel:** Primero medio.

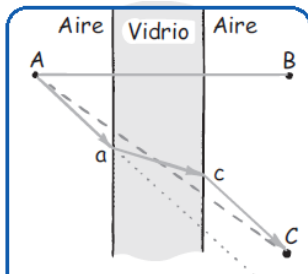
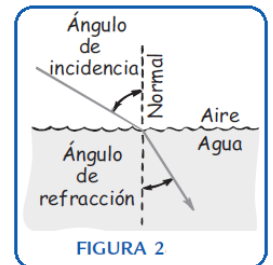
La luz viaja a distintas rapidezces en diferentes materiales. Se propaga a 300,000 kilómetros por segundo en el vacío; a una rapidez un poco menor por el aire, y a unas tres cuartas partes de ese valor en el agua. En un diamante se propaga a más o menos el 40% de su rapidez en el vacío. Cuando pasa oblicuamente de un medio a otro, suele desviarse, a tal desviación se le llama **refracción**. Es común observar que un rayo de luz se desvía y alarga su trayectoria cuando llega a un vidrio o al agua, formando un ángulo. Sin embargo, la trayectoria más larga es la que requiere menor tiempo (igualmente se aplica el principio de tiempo mínimo que explicamos en la guía de la semana 21). Una trayectoria recta necesitaría más tiempo. Esto se puede ilustrar con el siguiente caso.

Imagina que eres un salvavidas en una playa, y que ves a una persona que tiene dificultades dentro del agua. En la figura 1 están las posiciones relativas de ti, de la costa y de la persona con problemas. Estás en el punto A y la persona está en el punto B. Puedes ir más rápido corriendo que nadando. ¿Deberías ir en línea recta hasta la persona? Pensándolo bien verás que no sería lo óptimo ir en línea recta, porque



aunque te tardes un poco más corriendo por la playa, ahorrarías bastante tiempo al nadar menor distancia en el agua. La trayectoria de mínimo tiempo se indica con las líneas punteadas, y es claro que no coincide con la trayectoria de la mínima distancia. La cantidad de flexión en la costa depende, naturalmente, de cuánto más rápido puedas correr que nadar. La situación es similar con un rayo de luz que incide en un

cuerpo de agua, como se ve en la figura 2. El ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de refracción, una cantidad que depende de las rapidezces relativas de la luz en el aire y en el agua.



**FIGURA 3**  
 Refracción a través del vidrio. Aunque la línea punteada A-C es el camino más corto, la luz va por un camino un poco más largo por el aire, desde A hasta a, y luego por un camino más corto a través del vidrio hasta c, y después llega a C. La luz que sale está desplazada, pero es paralela a la luz incidente.

Veamos lo que pasa en el vidrio grueso de una ventana, como en la figura

3. Cuando la luz va el punto A, atraviesa el vidrio y llega al punto B, su trayectoria será una recta. En este caso, la luz llega al vidrio perpendicularmente, y vemos que la distancia mínima tanto a través del aire como del vidrio equivale al tiempo mínimo. Pero, ¿y la luz que va del punto A al punto C? ¿Seguirá la trayectoria rectilínea indicada por la línea punteada? La respuesta es *no*, porque si lo hiciera tardaría más en el vidrio, donde tiene menos rapidez que en el aire. En cambio, la luz seguirá una trayectoria menos inclinada para atravesar el vidrio.

El tiempo ahorrado al tomar la trayectoria más corta por el vidrio compensa el tiempo adicional necesario para recorrer la trayectoria un poco más larga por el aire. La trayectoria total es la que requiere el tiempo mínimo. El resultado es un desplazamiento paralelo del rayo de luz, porque los ángulos de entrada y de

### Examínate 1

Imagina que nuestro salvavidas del ejemplo fuera una foca, en vez de un ser humano. ¿Cómo cambiaría su trayectoria de tiempo mínimo de A a B?



salida del vidrio son iguales. Observarás este desplazamiento al ver a través de un vidrio grueso en sentido oblicuo. Cuanto más se aparte tu visual de la perpendicular, el desplazamiento será más pronunciado.

Otro ejemplo interesante es el prisma, en el que no hay caras paralelas opuestas en el vidrio (figura 4). La luz que va del punto A al punto B no sigue la trayectoria rectilínea indicada con la línea punteada, porque tardaría demasiado tiempo en el vidrio. En cambio, la luz irá por la trayectoria indicada con la línea continua –una trayectoria que es bastante mayor en el aire–, y pasará por una sección más delgada del vidrio, para llegar hasta el punto B. Con este razonamiento cabría pensar que la luz debería acercarse más al vértice superior del prisma, para buscar el espesor mínimo del vidrio. Pero si lo hiciera, la distancia mayor por el aire daría como resultado un tiempo total mayor de recorrido. La trayectoria que se sigue es la trayectoria del tiempo mínimo.

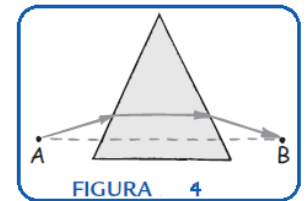


FIGURA 4

Es interesante destacar que si a las caras de un prisma se les da la curvatura adecuada, se podrán tener muchas trayectorias de tiempo igual desde un punto A en un lado, hasta un punto B en el lado opuesto (figura 5). La curva disminuye el espesor del vidrio en forma adecuada para compensar las distancias adicionales que recorre la luz hasta los puntos más cercanos a la cúspide. Para las posiciones adecuadas de A y de B, y con la curvatura correcta en las superficies de este prisma modificado, todas las trayectorias de la luz se recorren exactamente en el mismo tiempo. En este caso, toda la luz de A que llega a la superficie del vidrio se enfocará en el punto B.

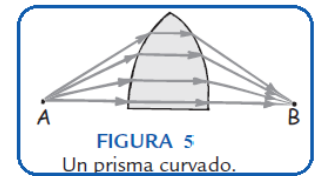


FIGURA 5  
Un prisma curvado.

Es útil mencionar esta situación, ya que esta forma sólo es la mitad superior de una lente convergente (figura 6; la que deberemos estudiar más adelante).

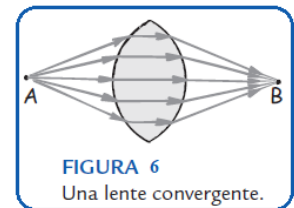


FIGURA 6  
Una lente convergente.

### Posición aparente del sol y las estrellas

Siempre que contemplamos una puesta de Sol, lo vemos varios minutos después de que ha bajado del horizonte. La atmósfera terrestre es delgada arriba y densa abajo. Como la luz viaja con más rapidez en el aire enrarecido que en el aire denso, la luz solar nos puede llegar con más rapidez si, en vez de sólo recorrer una línea recta, evita el aire más denso y toma una trayectoria más alta y más larga para penetrar en la atmósfera con mayor inclinación (figura 7). Como la



FIGURA 7  
Debido a la refracción atmosférica, cuando el Sol está cerca del horizonte, parece que está más alto en el cielo.

densidad de la atmósfera cambia en forma gradual, la trayectoria de la luz se flexiona también en forma gradual, y toma la forma de una curva. Es interesante el hecho de que esta trayectoria de tiempo mínimo permite tener días un poco más largos. Además, cuando el Sol (o la Luna) está cerca del horizonte, los rayos de la orilla inferior se flexionan más que los de la orilla superior, y se produce un acortamiento del diámetro vertical, lo cual hace que el Sol parezca elíptico (figura 8).

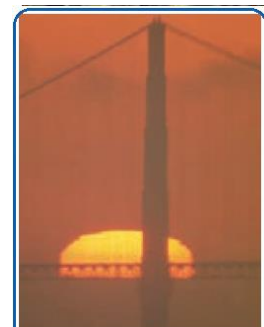


FIGURA 8  
La forma del Sol se distorsiona debido a la refracción diferencial.

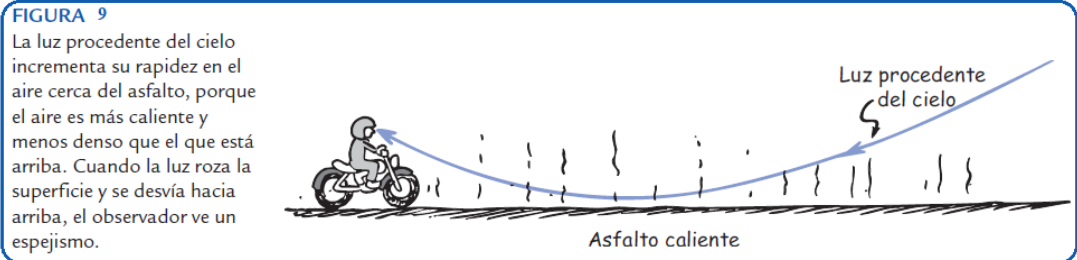
### Espejismos

Todos hemos visto los espejismos que se producen al conducir un automóvil sobre asfalto caliente. Parece que el cielo se refleja en el agua que hay a lo



lejos sobre la carretera; pero al llegar al lugar, vemos que el asfalto está seco. ¿Qué es lo que sucede? El aire está muy caliente muy cerca de la superficie del asfalto, y está más frío arriba. La luz se propaga con más rapidez por el aire caliente, menos denso, que por el aire frío y más denso de arriba. Así, la luz, en vez de llegarnos desde el cielo en línea recta, también tiene trayectorias de tiempo mínimo en las que baja hasta la parte más caliente que está cerca del asfalto, durante cierto tiempo, antes de llegar a nuestros ojos (figura 9). Un espejismo no es, como mucha gente cree en forma equivocada, un “truco de la mente”. Un espejismo se

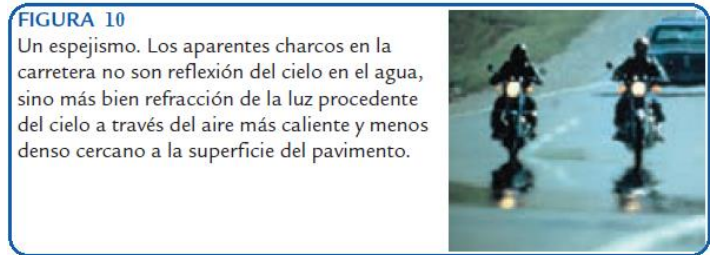
produce con luz real y se puede fotografiar, como en la figura 10. Cuando vemos un objeto sobre una



**FIGURA 9**  
 La luz procedente del cielo incrementa su rapidez en el aire cerca del asfalto, porque el aire es más caliente y menos denso que el que está arriba. Cuando la luz roza la superficie y se desvía hacia arriba, el observador ve un espejismo.

estufa caliente, o sobre pavimento caliente, notamos un efecto ondulatorio. Esto se debe a las distintas trayectorias de tiempo mínimo de la luz, al pasar por distintas temperaturas y en consecuencia a través de aire de distintas densidades. El titilar de las estrellas es resultado de fenómenos parecidos en el cielo, cuando la luz atraviesa capas inestables en la atmósfera.

En los ejemplos anteriores, ¿cómo es que la luz “sabe” qué condiciones existen y qué compensaciones se requieren para que la trayectoria sea de tiempo mínimo? Cuando se acerca a una ventana en determinado ángulo, ¿cómo sabe la luz que tiene que viajar un poco más en el aire para ahorrar tiempo al tomar un ángulo menos inclinado y, por lo tanto, una trayectoria más corta a través del vidrio?

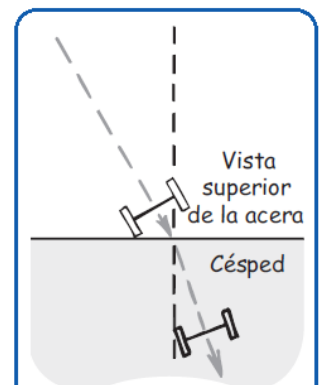


**FIGURA 10**  
 Un espejismo. Los aparentes charcos en la carretera no son reflexión del cielo en el agua, sino más bien refracción de la luz procedente del cielo a través del aire más caliente y menos denso cercano a la superficie del pavimento.

Cuando se acerca a un prisma o a unos lentes, ¿cómo sabe la luz que debe viajar una mayor distancia en el aire para atravesar la parte más delgada del vidrio? ¿Cómo sabe la luz solar cómo viajar sobre la atmósfera una distancia adicional para tomar un atajo por el aire más denso, y así ahorrar tiempo? ¿Cómo sabe la luz del cielo que puede llegarnos en un tiempo mínimo si se inclina hacia el pavimento caliente, antes de subir hacia nuestros ojos? Parece que el principio del tiempo mínimo no es causal. Es como si la luz tuviera una mente propia, que pueda “sentir” todas las trayectorias posibles, calcular los tiempos en cada una y elegir la que requiere menos tiempo. ¿Es así? Con todo lo intrigante que parezca, hay una explicación más sencilla que no asigna previsión a la luz: que la refracción es una consecuencia de que la luz tiene distinta rapidez promedio en diferentes medios.

### Causa de la refracción

La refracción sucede cuando la rapidez promedio de la luz *cambia* al pasar de un medio transparente a otro. Esto se entenderá mejor si imaginamos la acción de un par de ruedas de un carrito de juguete, montadas en un eje pero no unidas a él, y el carrito rueda suavemente cuesta abajo por un pasillo y después llega al césped. Si las ruedas entran al césped formando un ángulo (figura 11), serán desviadas de su trayectoria rectilínea. La dirección de las ruedas se indica con la línea punteada. Observa que al llegar al césped, donde las ruedas giran con mayor lentitud por la resistencia del césped, la rueda izquierda se desacelera primero. Eso se debe a que llega al césped mientras



**FIGURA 11**  
 La dirección de las ruedas cambia cuando una va más lenta que la otra.



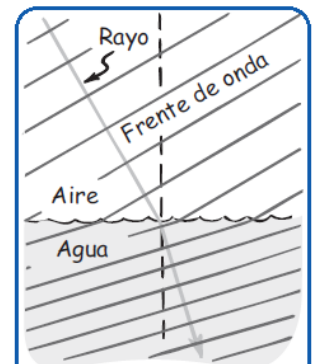
que la rueda derecha todavía está sobre el pasillo liso. La rueda derecha, más rápida, tiende a girar en torno a la izquierda, más lenta, porque durante el mismo intervalo de tiempo esa rueda derecha recorre más distancia que la izquierda. Esta acción desvía la dirección de rodadura de las ruedas, hacia la “normal”, que es la línea punteada delgada perpendicular al borde entre el césped y el pasillo en la figura 11.

**Examínate 1**

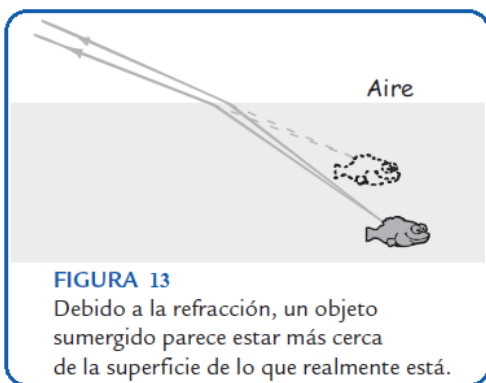
Si la rapidez de la luz fuera igual en todos los medios, ¿seguiría ocurriendo refracción al pasar la luz de un medio a otro

Una onda luminosa se desvía en forma parecida, como se muestra en la figura 12. Observa la dirección de la luz, representada por la flecha continua (el rayo de luz) y también nota los *frentes de onda* en ángulo recto al rayo de luz. (Si la fuente luminosa estuviera cerca, los frentes de onda se verían como segmentos de círculos; pero si suponemos que el lejano Sol es la fuente, los frentes de onda forman prácticamente líneas rectas.) Los frentes de onda son siempre perpendiculares a los rayos de luz. En la figura, la onda llega a la superficie del agua formando un ángulo, por lo que la parte izquierda de la onda va más lenta en el agua; mientras que la parte que todavía está en el aire viaja a la rapidez  $c$ . El rayo o haz de luz queda perpendicular al frente de onda y se flexiona en la superficie, de la misma manera que las ruedas cambian de dirección cuando pasan de la acera al césped. En ambos casos, la desviación es una consecuencia de un cambio de rapidez.

La refracción de la luz es responsable de muchas ilusiones. Una de ellas es el doblez aparente de un lápiz parcialmente sumergida en agua. La parte sumergida parece más cercana a la superficie de lo que realmente está. Asimismo, cuando observas un pez en el agua, parece que está más cerca de la superficie (figura 13). Debido a la refracción, los objetos sumergidos parecen estar aumentados. Si vemos directo hacia abajo en el agua, un objeto sumergido a 4 metros parecerá estar sólo a 3 metros de profundidad.



**FIGURA 12**  
 La dirección de las ondas luminosas cambia cuando una parte de cada una va más lenta que la otra parte.



**FIGURA 13**  
 Debido a la refracción, un objeto sumergido parece estar más cerca de la superficie de lo que realmente está.

**Examínate 1**

La foca puede nadar más rápido de lo que puede arrastrarse por la arena, y su trayectoria se desviaría como se observa en la figura; es el mismo caso de cuando la luz sale del fondo de un vaso con agua y entra en el aire.

**Examínate 2**

No. La luz siempre viajaría en línea recta.

