

de reflejar especularmente la luz en mayor ó menor proporción, varía á igualdad de pulimento con la naturaleza de las substancias y con el ángulo de incidencia. De cien rayos recibidos por el agua, el cristal, el mármol negro pulimentado, el azogue, el estaño de espejos, con una incidencia de 50° , la primera refleja 72, el segundo 54, y el tercero 60, y el mercurio y el estaño de espejos 70. Si la incidencia aumenta, el número de rayos reflejados disminuye para los tres primeros cuerpos en progresión rápida, no siendo más que de 2 ó 3 á lo sumo entre 60° y 90° , al paso que con esta última incidencia el mercurio refleja todavía 69 rayos sobre 100.

Los cuerpos de color obscuro reflejan muy poca luz. El negro de humo no refleja luz difusa, y si tan sólo una escasa cantidad de luz especular.

Cuando la reflexión de la luz tiene efecto en una superficie pulimentada, pero transparente, reproducen también las imágenes, pero muy debilitadas, porque una gran parte de la luz incidente atraviesa la substancia. Por esta causa los espejos se azogan por su parte posterior, y entonces las claras imágenes que se forman en la capa metálica opaca de gran pulimento amortiguan con su brillo las tenues imágenes producidas por la reflexión en la cara anterior del cristal.

Pero también se pueden emplear las lunas sin azogar, produciendo imágenes muy brillantes y de vivos colores, cuando los objetos que reflejan reciben mucha luz y al mismo tiempo el espacio que las rodea, sumido en una obscuridad relativa, recibe poca ó ninguna luz difusa. En esto se basa el principio de las apariciones fantásticas conocidas en el teatro con el nombre de *espectros*, acerca de lo cual indicaremos algo en las *Aplicaciones de la óptica*.

CAPITULO V

REFRACCIÓN DE LA LUZ

I

FENÓMENOS DE REFRACCIÓN

En los capítulos anteriores hemos visto que todo haz luminoso se propaga siguiendo una dirección rectilínea en un medio homogéneo; que si tropieza en la superficie de un cuerpo sin salir de este medio, una parte mayor ó menor de los rayos que componen el haz primitivo regresa ó se refleja en el medio de donde había partido, siguiendo para esta nueva dirección las leyes de la reflexión. Vamos ahora á examinar el caso en que el haz luminoso pase de un medio homogéneo á otro que también lo sea, pero de naturaleza y sobre todo de densidad diferentes.

Hagamos penetrar en la cámara oscura un haz de luz solar, y pongamos en su camino una cubeta rectangular llena de agua, cuyas paredes sean placas de cristal transparentes. Como el agua y el aire contienen siempre partículas de polvo en suspensión, se verá fácilmente en la obscuridad el camino seguido por el haz.

Si la dirección de los rayos luminosos es normal ó perpendicular á la cara de la cubeta, se advertirá que su trayectoria es enteramente rectilínea: el haz, que tiene en el aire la dirección AS (fig. 464), entrará en la cubeta sin desviarse, seguirá el rumbo AB,

prolongación del camino aéreo, y saldrá lo mismo por la cara opuesta. Las tres líneas AS, AB y CB serán una sola línea recta.

Si, por el contrario, se hace llegar el haz luminoso oblicuamente, se notará una desviación: el haz AS se acercará á la normal al entrar en el agua, pero se apartará de ella á la salida, de suerte que el camino CB seguido en el aire después del paso por la cubeta será paralelo á la dirección primitiva (fig. 465).

Esta desviación sufrida por la dirección de un rayo luminoso al pasar de un medio á otro es lo que se llama *refracción de la luz*, dándose el nombre de *medios refringentes* á los que originan los fenómenos de refracción. En breve veremos que estos fenómenos son más complejos de lo que lo haría suponer el experimento que acabamos de describir, y con frecuencia van acompañados de efectos de coloración que estudiaremos aparte con el nombre de fenómenos de *dispersión*. Por otro lado, hay medios refringentes en los cuales se divide el haz en dos partes distintas, siguiendo una de ellas las leyes de refracción ordinaria ó *simple*, y hallándose la segunda sometida á otras leyes. Entonces se dice que hay *doble refracción*.

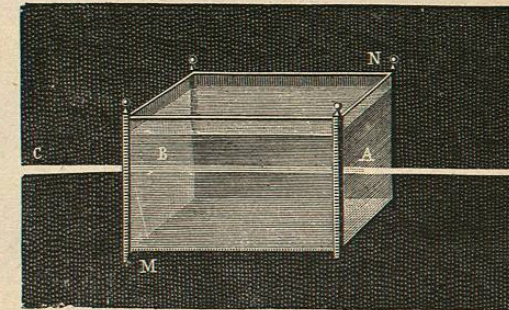


Fig. 464.—Incidencia normal; falta de desviación

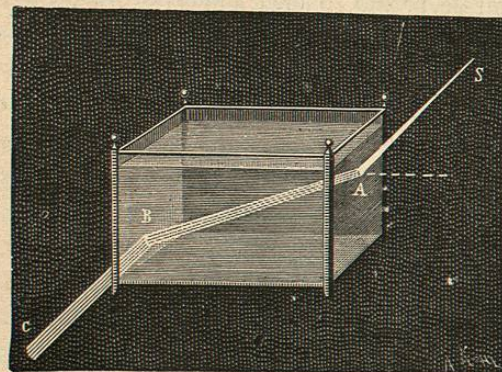


Fig. 465.—Incidencia oblicua. Refracción

Nos ocuparemos en primer lugar de la refracción simple, describiendo algunos de los efectos que produce en el aspecto aparente de los objetos vistos á través de los medios refringentes.

Cuando sumergimos un palo recto en el agua transparente, parece que la parte vista á través del líquido (figura 466) no es continuación en línea recta de la porción que queda fuera del agua: el palo parece roto en la superficie del líquido, y el extremo sumergido parece también levantado y más corto de lo que debiera, ó que el agua es menos profunda en aquel sitio. Si colocamos el palo vertical-

mente, ó si el ojo recibe los rayos visuales en una dirección que lo haga aparecer como si estuviera vertical, entonces no parece quebrado el palo, sino sencillamente más corto.

Puede hacerse con facilidad este experimento, sumergiendo el extremo de un lapicero en un vaso lleno de agua clara. Si antes de llenar el vaso del líquido transparente se observa el fondo por encima de los bordes desde un punto fijo, y luego, sin cambiar de postura, se vierte el agua progresivamente, se ve que los contornos del fondo se elevan poco á poco y que al fin aparecen más altos de lo que al principio indicaba la simple perspectiva. Para que el experimento sea más perceptible, se coloca una moneda pegada con cera al fondo del vaso ó vasija, de manera que los bordes la oculten á la vista, y en seguida se va echando agua en ésta. A medida que sube el nivel del

líquido, se hace visible el objeto y toma la posición aparente que indica la figura 467. Nadie habrá seguramente que no haya tenido ocasión de observar efectos análogos. Por ejemplo, los objetos vistos por transparencia á través de una botella llena de agua aparecen deformados, de mayor tamaño y fuera de su posición natural: al seguir con la vista los movimientos de los peces que se tienen en una pecera, llama la



Fig. 466.—Fenómenos de refracción. Palo roto

atención que estos animales desaparezcan de pronto, ó bien adquieran un tamaño desmesurado y que luego disminuyan hasta el punto de aparecer con sus dimensiones verdaderas.

Todos estos fenómenos reconocen por causa la *refracción de la luz*, es decir, la

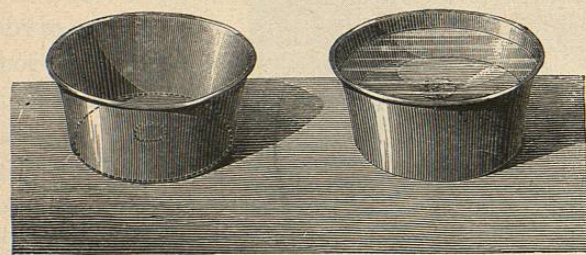


Fig. 467.—Elevación aparente del fondo de una vasija por refracción

desviación que los rayos luminosos sufren al pasar de un medio á otro, por ejemplo del aire al agua.

Ocurren fenómenos semejantes no tan sólo en toda clase de líquidos, sino también en los sólidos transparentes, como el cristal, y también en todos los gases, con la diferencia, según veremos más adelante, de que la desviación varía con la oblicuidad de la luz en el momento en que ésta cambia de medio, y con la naturaleza y densidad de los diferentes medios. Hace ya mucho tiempo que se demostraron los principales efectos de la refracción de la luz, y el aspecto de los objetos á través de un agua límpida sirvió

sin duda para esclarecer en este punto las ideas de los sabios de la antigüedad (1). Los antiguos astrónomos, Tolomeo por ejemplo, conocían los efectos de la refracción atmosférica ó desviación que sufren los rayos luminosos de los astros al pasar del vacío de los espacios planetarios á las capas cada vez más densas de la atmósfera; sin embargo, hasta principios del siglo XVII no se descubrieron las leyes que rigen la marcha de un rayo luminoso cuando pasa de un medio homogéneo á otro también homogéneo, descubrimiento efectuado por un joven geómetra holandés llamado Willebrod Snell. Estas leyes llevan á veces el nombre de Descartes, porque este grande hombre las descubrió á su vez, ó por lo menos las formuló de un modo que todavía subsiste en la ciencia.

II

LEYES DE LA REFRACCIÓN DE LA LUZ

Un rayo ó haz luminoso se propaga de un medio homogéneo á otro también homogéneo, y llega á un punto de la superficie de separación, formando con la línea perpendicular ó normal á esta superficie cierto ángulo que se llama *ángulo de incidencia*. Al penetrar en el segundo medio, continúa su marcha en línea recta, pero siguiendo una dirección más ó menos desviada de la primera y formando con la normal un ángulo llamado *ángulo de refracción* y que por lo común no es igual al de incidencia. ¿En qué relación se encuentran ambos ángulos? ¿Cuál es la dirección del haz ó rayo refractado respecto del haz ó rayo incidente? A estas preguntas responden los enunciados de las leyes de la refracción simple.

He aquí cómo se pueden demostrar experimentalmente estas leyes:

Al efecto podemos valernos del aparato representado en la figura 468, que, como se ve, se compone de un círculo vertical graduado en cuyo centro hay un vaso de vidrio fijo de forma cilíndrica cuyo eje es horizontal y pasa por el centro del círculo. Se le llena hasta la mitad de agua ú otro líquido; y si se coloca el aparato de tal suerte que se halle el círculo en posición vertical, la superficie del líquido tranquilo, que es horizontal, cortará el círculo en su centro y será perpendicular al diámetro vertical, diámetro que coincide con el cero de las divisiones del limbo.

Se hace llegar entonces un rayo incidente, que provenga por ejemplo del Sol, al punto I de un espejo que se inclina de modo que refleje el rayo en la dirección del centro O del círculo á través del agujerito de un diafragma, fijo como el espejo á una alidada móvil alrededor del centro. El rayo atraviesa la pared cilíndrica de cristal, llega á la superficie del agua, penetra en el líquido y sale por el contorno del cilindro de cris-

(1) Euclides hizo ya mención del experimento de la vasija que se llena de agua y cuyo fondo parece elevarse progresivamente, y Aristóteles observó que los remos parece que se rompen al salir del agua. Séneca se ocupa, con más ó menos exactitud, en el libro I de las *Cuestiones naturales*, de algunos efectos de la refracción. "Todos los objetos vistos á través del agua, dice, parecen mucho más grandes. Los caracteres pequeños y confusos leídos al través de un globo de cristal ó de una redoma llena de agua aparecen mayores y más claros. Los frutos puestos en una vasija de cristal llena de agua parecen más hermosos de lo que son en realidad, y los astros más grandes vistos al través de una nube (?), porque la vista humana no puede penetrar en un fluido ni percibir exactamente los objetos. Esto último se hace patente llenando de agua una copa y echando en ella un anillo; por más que éste permanezca en el fondo, su imagen se reproduce en la superficie. Todo cuanto se ve á través de un líquido cualquiera es de tamaño bastante mayor que el natural." De esta cita se desprende que los antiguos habían observado los fenómenos de refracción, pero que los conocían imperfectamente y sobre todo que ignoraban sus condiciones y sus leyes.

tal. He aquí lo que entonces se observa: Si el rayo luminoso incidente entra en el líquido siguiendo la dirección de la vertical, sale sin desviarse, lo cual se demuestra recibiendo en el centro de otro diafragma fijo á una segunda alidada, de modo que cuando la incidencia es vertical no hay refracción.

Si se hace variar el ángulo de incidencia, se observa que el de refracción varía también; pero en todos los casos y en todas las posiciones de la alidada por donde llega el rayo incidente, el rayo refractado, después de su salida del cilindro, lo cual se efectúa sin nueva desviación, coincide siempre en dirección con el eje de la segunda alidada. Este resultado, que demuestra la segunda ley, se enuncia del modo siguiente:

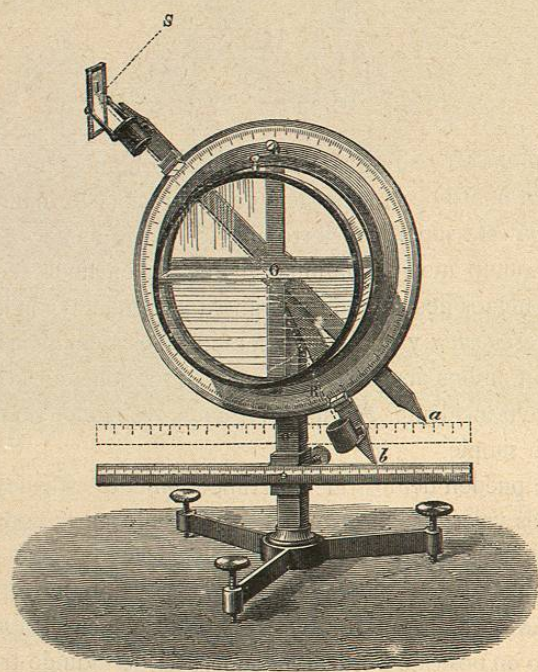


Fig. 468 — Demostración experimental de las leyes de la refracción

Cuando un rayo luminoso pasa de un medio á otro, se quiebra, y el rayo incidente y el refractado permanecen en un mismo plano perpendicular ó normal á la superficie de separación de los dos medios.

Ahora hay que hallar la ley de variación de los ángulos de refracción y de incidencia. Por medio de la primera alidada, provista de una punta en su extremidad opuesta, se obtiene la dirección del rayo incidente, y se puede medir la línea *oa* en una regla graduada horizontal, capaz de moverse paralelamente á sí misma. Esta línea, ó mejor dicho su relación con la longitud del radio *oO*, es lo que llaman los geómetras *seno del ángulo de incidencia*. Otra alidada, provista igualmente de un tubito ó diafragma agujereado, recibe el rayo luminoso refractado después de pasar por el agua, y se mide *ob* en la regla: la relación de *ob* con el radio *Oo* igual á *Oa* da el *seno del ángulo de refracción*. Advertiremos que al salir el rayo del agua para volver á pasar al aire, no sufre ninguna nueva refracción, puesto que sale por una incidencia normal á la superficie del vaso cilíndrico.

Pues bien, supongamos que la primera observación haya dado dos senos tales que, dividiendo el ángulo de incidencia por el de refracción, el cociente ó relación sea 1,335.

Repitamos el experimento una, dos, tres ó más veces, cambiando á cada una de ellas la dirección del rayo incidente. A cada nuevo experimento, la relación del seno de incidencia y del de refracción seguirá siendo 1,335. Y lo mismo sucederá mientras los medios sean el aire y el agua; pero este número, que se llama *índice de refracción* (1),

(1) A cada momento es preciso tener en cuenta los índices de refracción en los problemas de dióptrica: la construcción de los instrumentos en que se emplean prismas y lentes de varias substancias refringentes requiere también que se conozca con precisión este elemento. Por último, en química y en mineralogía el índice de refracción es un carácter que sirve para distinguir entre sí ciertas substancias que podrían confundirse por su aspecto exterior. Así es que desde Descartes hasta nuestros días, los físicos se han dedicado á idear ó perfeccionar los métodos que tienen por objeto la medición de los índices de refracción, ya de los cuerpos sólidos refringentes, ya de los líquidos ó bien de los gases.

No nos es posible descender aquí á los detalles que requeriría la exposición de estos métodos; pero como podrá ser útil conocer los resultados obtenidos, á lo menos respecto de algunas de las substancias más comunes, los resumimos en el cuadro siguiente:

ÍNDICES DE REFRACCIÓN

Cuerpos sólidos

Cromato de plomo..	2,50 á 2,97
Diamante.	2,60
Fósforo.	2,22
Azufre nativo.	2,115
Rubi.	1,779
Cristal (flint-glass).	1,605
Esmeralda.	1,585
Sal gema.	1,550
Cristal de Saint Gobain.	1,543
Cuarzo.	1,540
Azúcar piedra.	1,535
Bálsamo del Canadá.	1,530
Vidrio (crown-glass).	1,529
Alumbre.	1,441 á 1,488
Borato de sosa.	1,475
El cristalino del ojo.	1,384
Hielo (agua sólida).	1,310

Líquidos

Sulfuro de carbono á 0°.	1,644
— á 20°.	1,624
Aceite de linaza.	1,481
— de nafta.	1,475
— de oliva.	1,470
Alcohol absoluto á 10°.	1,366
— á 25°.	1,360
Agua destilada á 0°.	1,333
— á 30°.	1,331
Humor acuoso.	1,337
— vitreo.	1,339

Gases

Aire.	1,000294
Oxígeno.	1,000272
Hidrógeno.	1,000138
Nitrógeno.	1,000300

Debemos hacer observar que los índices de refracción de los sólidos y líquidos que preceden son los que corresponden á un haz de luz homogéneo (la de la raya D del espectro ó del alcohol salado). Más adelante

varía cuando cambia uno de los medios ó cuando cambian ambos; así pues, el índice de refracción del aire al cristal no es igual al del aire al agua. Por esta causa se calculan los medios de todos los cuerpos transparentes suponiendo que la luz pasa del vacío á cada uno de ellos, y entonces se obtienen los índices *absolutos*. Por lo común, es tanto mayor la refracción cuanto más denso es el medio, si bien hay algunas excepciones (1), de modo que las más de las veces la refringencia del medio crece con su densidad.

La segunda ley de la refracción de la luz (2) se puede enunciar de este modo:

La relación entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción de dos medios determinados es un número constante, cualquiera que sea la incidencia.

Las leyes que acabamos de estudiar indican el camino que sigue la luz cuando el haz luminoso pasa de un medio á otro; pero esta marcha, como lo demuestran el raciocinio y la práctica, es igual si la luz pasa del segundo medio al primero. Entonces el rayo incidente viene á ser el refractado y recíprocamente. Por ejemplo, si el punto lu-

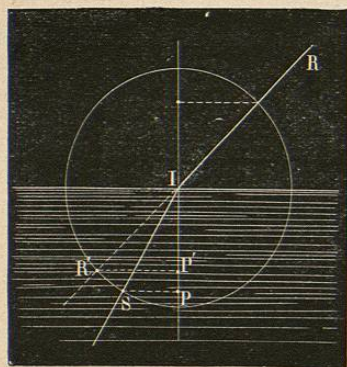


Fig. 469.—Ley de los senos

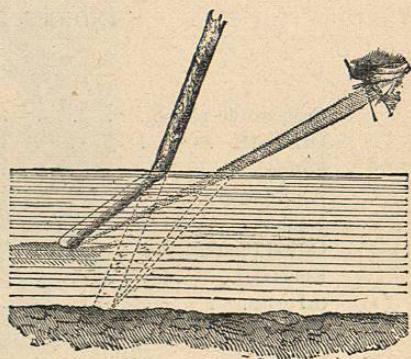


Fig. 470.—Explicación del palo roto

minoso está en el agua en S (fig. 469), el rayo que cae en el punto I de la superficie se desviará de la perpendicular siguiendo la dirección IR: la dirección SIR será la misma en sentido inverso que si el rayo incidente hubiera sido RI, por manera que los ángulos de incidencia y de refracción tendrán los senos inversos, pero su relación permanecerá siempre constante, todo lo cual equivale á decir que el índice de refracción de un medio para otro es el inverso del índice del segundo para el primero.

También se dice en términos generales que la luz que atraviesa una serie de medios transparentes sigue siempre el mismo camino, ya se propague en un sentido ó ya se dirija en el opuesto.

veremos que la luz blanca está formada de rayos que se refractan con desigualdad en los mismos medios. Por consiguiente, los índices de refracción de estos medios varían con la naturaleza de los rayos de luz que en ellos se refractan.

(1) Por ejemplo, la densidad del aceite de trementina es 0,869, es decir, menor que la del agua, y sin embargo, ésta es menos refringente que aquél. El índice de refracción del alcohol, del éter, de los aceites fijos y volátiles excede con mucho al del agua; pero la densidad de dichos cuerpos es menor que la de ésta.

(2) Más arriba hemos visto que el enunciado de esta ley se debe á Descartes. Keplero había ya reconocido que respecto de los ángulos pequeños de incidencia (hasta 30° próximamente) había proporcionalidad entre los ángulos de incidencia y de refracción; lo que es verdad hasta cierto punto, porque entonces los ángulos y los senos varían casi del mismo modo; pero también sabía que, pasado aquel límite, ya no era exacta dicha aproximación. Snell, que fué el primero en descubrir la ley, la formuló del modo siguiente: *La relación de las secantes de los ángulos de incidencia y de refracción es constante*, enunciado que ha sido sustituido por el que Descartes propuso en su *Tratado de dióptrica*.

Estas leyes permiten que podamos darnos cuenta de los fenómenos que hemos descrito al principio de este capítulo. El ojo que examina el extremo de un palo sumergido en el agua lo ve por el haz luminoso que envía este extremo á la superficie, haz que se refracta y cuyos diversos rayos, tanto más desviados cuanto más oblicua es su incidencia, penetran en el ojo divergiendo. El fenómeno es, pues, el mismo que si el punto luminoso estuviese en el punto de convergencia de estos rayos (fig. 470) y el ojo ve en efecto el extremo del palo en este punto. El mismo efecto se produce respecto de todos los puntos intermedios, y el palo parece torcido ó roto.

La misma explicación da cuenta de la elevación del fondo de una vasija llena de líquido, ó de la del de un arroyo ó de un río de agua cristalina. La profundidad real es



Fig. 471.—Elevación aparente del fondo de un río ó de una vasija. Explicación

siempre mayor que la aparente, y para calcularla se debe tener en cuenta la ilusión que resulta de la refracción. Al mirar el fondo, aun cuando sea en dirección perpendicular, se produce esta ilusión, porque el ojo no recibe un rayo único, sino un haz cuyos componentes divergen más al pasar al aire, á causa de la refracción, que en el líquido, apareciendo el punto O en O' (fig. 471), esto es, más cerca de la superficie; lo propio sucede con todos los puntos del fondo, ora se trate de una vasija, ó bien de un río.

III

FENÓMENOS DE REFLEXIÓN TOTAL

De las leyes de la refracción resulta un fenómeno singular, del que nos da cuenta la teoría y confirma la experiencia, y que ha recibido el nombre de *reflexión total*. He aquí en qué consiste el fenómeno en cuestión:

Consideremos, por ejemplo, un punto luminoso situado en el agua, en el fondo de una vasija: este punto envía rayos de luz en todas las direcciones posibles á la superfi-