

CAPÍTULO V

REFRACCION DE LA LUZ

I.

FENÓMENOS DE REFRACCION.

En los capítulos anteriores hemos visto que todo haz luminoso se propaga siguiendo una direccion rectilínea en un medio homogéneo;

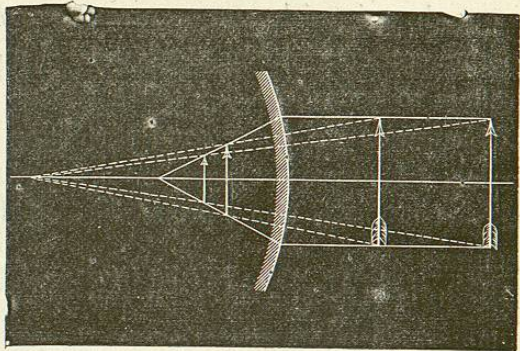


Fig. 47.—Espejo convexo. Imágen recta y virtual

examinar el caso en que el haz luminoso pase de un medio homogéneo á otro que tambien 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 cuba rectangular llena de agua, cuyas paredes sean placas de cristal transparentes. Como el agua y el aire contienen siempre partículas de polvo en suspension, se verá fácilmente en la oscuridad el camino seguido por el haz.

Si la direccion de los rayos luminosos es normal ó perpendicular á la cara de la cuba, se advertirá que su trayectoria es enteramente rectilínea: el haz, que tiene en el aire la direccion A S (fig. 56) entrará en la cuba sin desviarse, seguirá el rumbo A B, prolongacion del camino aéreo, y saldrá lo mismo por la cara opuesta. Las tres líneas A S, A B y C B serán una sola línea recta.

Si, por el contrario, se hace llegar el haz lu-

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 habia partido, siguiendo para esta nueva direccion las leyes de la reflexion. Vamos ahora á

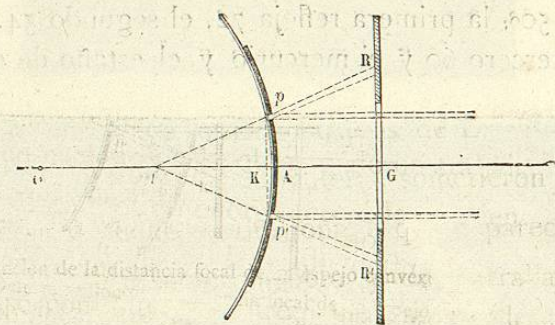


Fig. 48.—Determinacion de la distancia focal de un espejo convexo

mínoso oblicuamente, se notará una desviacion: el haz A S se acercará á la normal al entrar en el agua, pero se apartará de ella á la salida, de

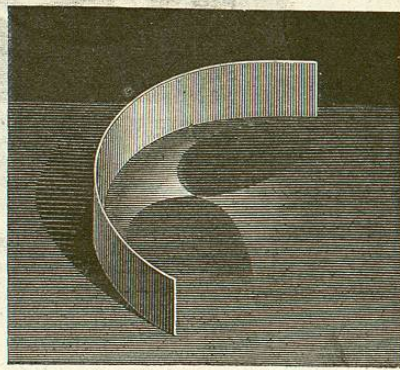


Fig. 49.—Cáustica por reflexion

suerte que el camino C B seguido en el aire despues del paso por la cubeta, será paralelo á la direccion primitiva (fig. 57).

Esta desviacion sufrida por la direccion de un rayo luminoso al pasar de un medio á otro es lo que se llama *refraccion de la luz*, dándo-

se el nombre de *medios refringentes* á los que originan los fenómenos de refraccion. En breve veremos que estos fenómenos son más complejos de lo que lo haria suponer el experimento que acabamos de describir, y con frecuencia



Fig. 50.—Cáustica por reflexion

van acompañados de efectos de coloracion que estudiaremos aparte con el nombre de fenómenos de *dispersion*. Por otro lado, hay medios refringentes en los cuales se divide el haz en dos partes distintas, siguiendo una de ellas las leyes de refraccion ordinaria ó *simple*, y hallándose la segunda sometida á otras leyes. Entónces se dice que hay *doble refraccion*.

Nos ocuparemos en primer lugar de la refraccion 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 (fig. 59) no es continuacion en línea recta de la porcion que queda fuera del agua: el palo parece roto en la superficie del líquido, y el extremo sumergido parece tambien levantado y más corto de lo que debiera, ó que el agua es ménos profunda en aquel sitio. Si colocamos el palo verticalmente, ó si el ojo recibe los rayos visuales en una direccion que lo haga aparecer como si estuviera vertical, entónces 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. Si ántes de llenar el

vaso del líquido trasparente se observa el fondo por encima de los bordes desde un punto fijo, y luégo, 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 esta. A medida que sube el nivel del líquido, se hace visible el objeto y toma la posicion aparente que indica la figura 58. Nadie habrá seguramente que no haya tenido ocasion 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 posicion natural: al seguir con la vista los movimientos de los peces que se tienen en una pecera, llama la atencion que estos animales desaparezcan de pronto, ó bien adquieran un tamaño desmesurado y que luégo disminuyan hasta el punto de aparecer con sus dimensiones verdaderas.

Todos estos fenómenos reconocen por cau-

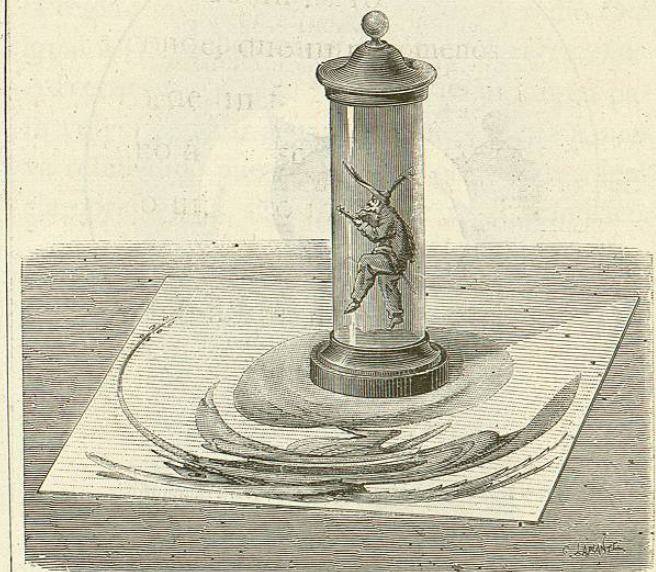


Fig. 51.—Espejo cilindrico. Anamorfosis

sa la *refraccion de la luz*, es decir, la desviacion 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 esta cambia de medio, y con la naturaleza y densidad de los diferentes medios.

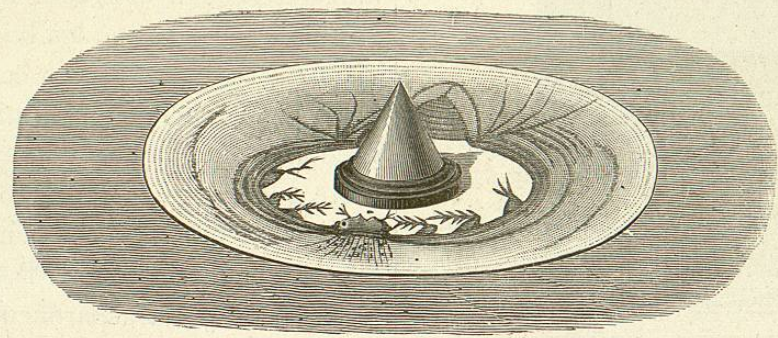


Fig. 52.—Reflexion en los espejos cóncavos. Anamorfosis

fracción 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

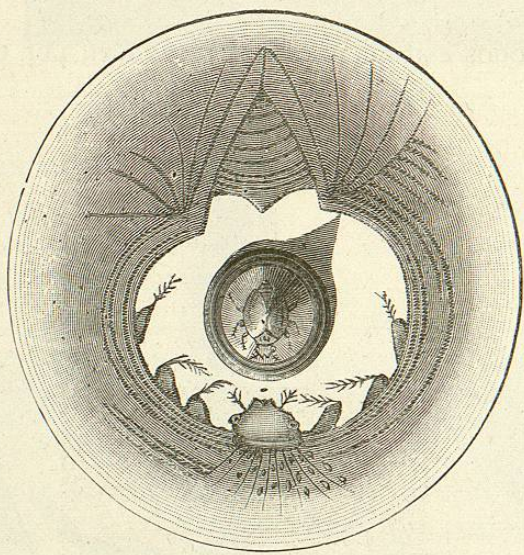


Fig. 53.—Reflexion en los espejos cóncavos. Anamorfosis

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 ménos las formuló de un modo que todavía subsiste en la ciencia.

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 re-

II

LEYES DE LA REFRACCION 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 ménos distinta de la primera y formando con la normal un ángulo llamado *ángulo de refracción* y que por lo comun no es igual al de incidencia. ¿En qué relación se encuentran ambos ángulos? ¿Cuál es la dirección del haz ó rayo re-

(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 ménos 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 una redoma llena de agua aparecen mayores y más claros. Los frutos puestos en agua 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 este 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.

fractado respecto del haz ó rayo incidente? A estas preguntas responden los enunciados de las leyes de la refracción simple.

Hé aquí cómo se pueden demostrar experimentalmente estas leyes:

Al efecto podemos valernos del aparato representado en la figura 60, que, como se ve, se compone de un círculo graduado en cuyo

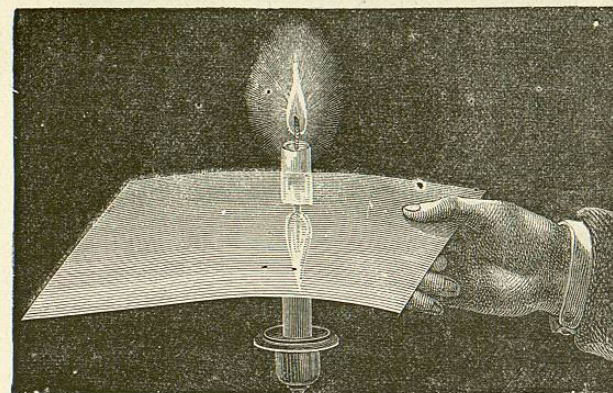


Fig. 54.—Luz reflejada con mucha oblicuidad

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 entónces 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 cristal. Hé aquí lo que entónces 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-lo 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:

«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 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 dividida horizontal, capaz de moverse paralelamente á sí misma. Esta línea, ó mejor dicho su relación con la longitud del radio *aO*, es lo que llaman los geómetras *seno del ángulo de incidencia*. Otra alidada, provista igualmente de un 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 *O b* igual á *O a* 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.

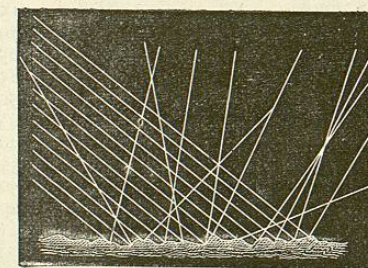


Fig. 55.—Reflexion irregular de la luz en la superficie de un cuerpo no bruñido

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 relacion del seno de incidencia y del de refraccion 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 re-*

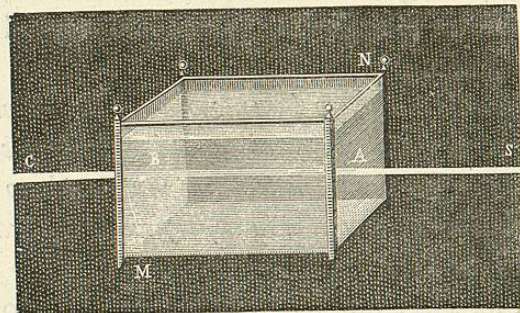


Fig. 56.—Incidencia normal; falta de desviacion

suponiendo que la luz pasa del vacío á cada uno de ellos, y entónces se obtienen los índices *absolutos* (1). Por lo comun, es tanto mayor

(1) A cada momento es preciso tener en cuenta los índices de refraccion en los problemas de dióptrica: la construcción de los instrumentos en que se emplean prismas y lentes de varias sustancias refringentes, requiere tambien que se conozca con precision este elemento. Por último, en química y en mineralogía el índice de refraccion es un carácter que sirve para distinguir entre si ciertas sustancias que podrian confundirse por su aspecto exterior. Así es que desde Descartes hasta nuestros dias, los físicos se han dedicado á idear ó perfeccionar los métodos que tienen por objeto la medicion de los índices de refraccion, 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 requeriria la exposicion de estos métodos; pero como podrá ser útil conocer los resultados obtenidos, á lo ménos respecto de algunas de las sustancias más comunes, los resumimos en el cuadro siguiente:

ÍNDICES DE REFRACCION

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 16°.	1,366
— á 25°.	1,360
Agua destilada á 0°.	1,333
— á 30°.	1,331
Humor acuoso.	1,337
— vítreo.	1,339

fraccion, varía cuando cambia uno de los medios ó cuando cambian ambos; así pues, el índice de refraccion del aire al cristal no es igual al del aire al agua. Por esta causa se calculan los medios de todos los cuerpos transparentes

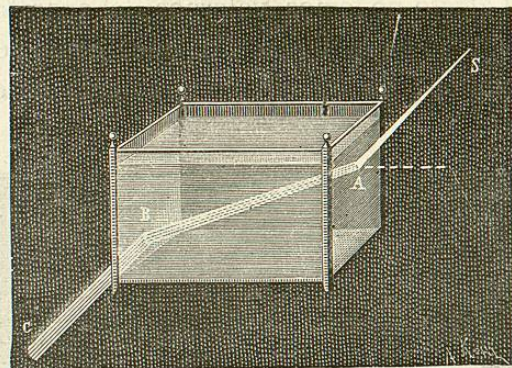


Fig. 57.—Incidencia oblicua. Refraccion

la refraccion cuanto más denso es el medio, si bien hay algunas excepciones (2), de modo que las más de las veces la refringencia del medio crece con su densidad.

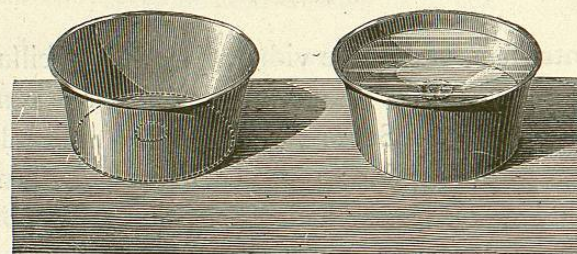


Fig. 58.—Elevacion aparente del fondo de una vasija por refraccion

La segunda ley de la refraccion de la luz (3), se puede enunciar de este modo:

La relacion entre los senos de los ángulos de

Gases

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

Debemos hacer observar que los índices de refraccion 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). Mas adelante veremos que la luz blanca está formada de rayos que se refractan con desigualdad en los mismos medios. Por consiguiente, los índices de refraccion de estos medios varían con la naturaleza de los rayos de luz que en ellos se refractan.

(2) Por ejemplo, la densidad del aceite de trementina es 0,869, es decir, menor que la del agua, y sin embargo, ésta es ménos refringente que aquél. El índice de refraccion 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.

(3) Más arriba hemos visto que el enunciado de esta ley se debe á Descartes. Keplero habia ya reconocido que respecto de los ángulos pequeños de incidencia (hasta 30° próximamente) habia proporcionalidad entre los ángulos de incidencia y de refraccion; lo que es verdad hasta cierto punto, porque entónces los ángulos y los senos varían casi del mismo modo; pero tambien sabia que, pasado aquel limite, ya no era exacta dicha aproximacion. Snell, que fué el primero en descubrir la ley, la formuló del modo siguiente: *La relacion de los senos de los ángulos de incidencia y de refraccion es constante*, enunciado que ha sido sustituido por el que Descartes propuso en su *Tratado de dióptrica*.

incidencia y de refraccion 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. Entónces el rayo incidente viene á ser el refractado y recíprocamente. Por ejemplo, si el punto luminoso está en el agua en S (fig. 62) el rayo que cae en el punto I de la superficie se desviará de la perpendicular siguiendo la direccion I R: la direccion S I R



Fig. 59.—Fenómenos de refraccion. Palo roto

será la misma en sentido inverso que si el rayo incidente hubiera sido R I, por manera que los ángulos de incidencia y de refraccion tendrán los senos inversos, pero su relacion permanecerá siempre constante, todo lo cual equivale á decir que el índice de refraccion de un medio para otro es el inverso del índice del segundo para el primero.

Tambien 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.

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. 63) 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 explicacion da cuenta de la eleva-

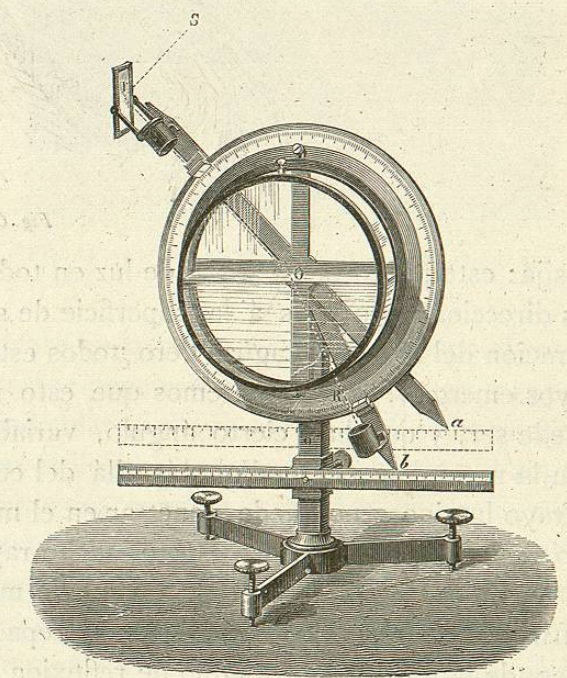


Fig. 60.—Demostracion experimental de las leyes de la refraccion

cion del fondo de una vasija llena de líquido, ó de la del de un arroyo ó de un rio de agua cristalina. La profundidad real es siempre mayor que la aparente, y para calcularla se debe tener