

IR un rayo incidente SI, es decir, se aparta del eje (fig. 451); en este caso ya no habrá convergencia de los rayos que componían el haz luminoso, y por consiguiente tampoco habrá imagen real, según nos lo había enseñado la experiencia. Con todo, se demuestra que, prolongando por detrás del eje los rayos reflejados, se cortan en un punto s , formando así un foco que, por oposición al foco real de los casos precedentes, lleva el nombre de *foco virtual*.

Y en efecto, un espectador situado delante del espejo percibe siempre una imagen, porque los rayos divergentes penetran en su ojo siguiendo la misma marcha que si en

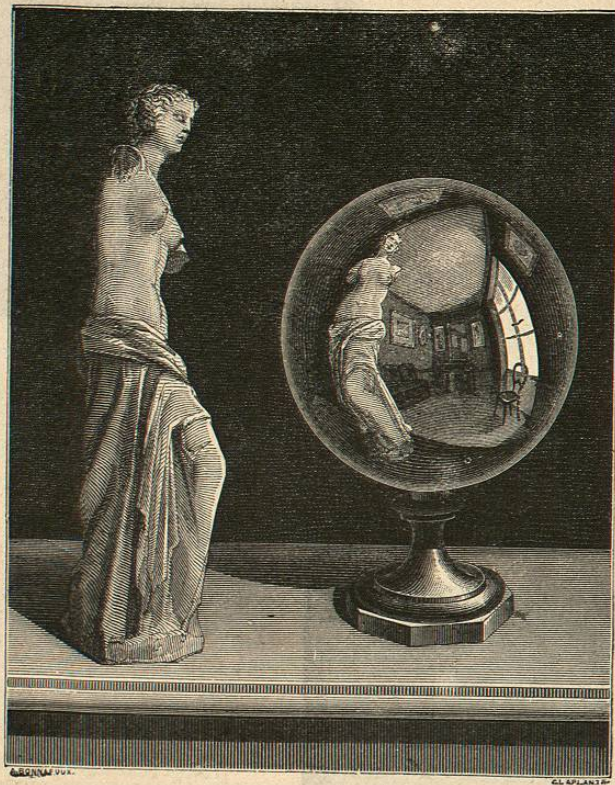


Fig. 454.—Imagen recta virtual en los espejos esféricos convexos

realidad emanaran del punto s . La imagen es entonces virtual, lo propio que la vista en un espejo plano.

Si se ha comprendido bien la marcha de un haz luminoso que cae sobre la superficie de un espejo cóncavo, y cómo produce después de su reflexión un haz reflejado, convergente ó divergente, según la posición del punto luminoso, no será ya difícil darse cuenta de la producción de las imágenes de los objetos, imágenes ora reales, ora virtuales, ya más grandes, bien más pequeñas que los objetos mismos, y finalmente unas veces rectas y otras invertidas. En las figuras 452 y 453 se ven dos ejemplos de ello.

Véase cuáles son las reglas de la construcción geométrica de las imágenes, y cómo se pueden explicar sus posiciones y sus dimensiones comparadas con las del objeto. Primeramente se buscan las imágenes de cada punto extremo A, B. Con este objeto se reúne cada uno de estos puntos con el centro del espejo, lo cual nos da las líneas AC, BC, que son los ejes secundarios; luego se trazan los rayos paralelos al eje principal

que, según hemos visto, deben reflejarse en el foco F. Los puntos de encuentro de los rayos reflejados con el eje secundario correspondiente dan a y b , que son los focos de los puntos A y B, es decir, aquellos en que se forman las imágenes de las extremidades del objeto.

Los focos y las imágenes son siempre virtuales en los espejos convexos, porque los rayos de que se compone el haz luminoso incidente divergen siempre después de su reflexión, como puede verse si se observa la marcha de alguno de ellos. También se ve en qué consiste que la imagen sea recta en esos espejos (fig. 455), pero siempre más pequeña que el objeto. Por lo demás, las dimensiones son tanto más reducidas cuanto mayor es la distancia del objeto al espejo. Si la abertura de éste es muy grande, se nota una deformación que está en relación de la amplitud de aquélla.

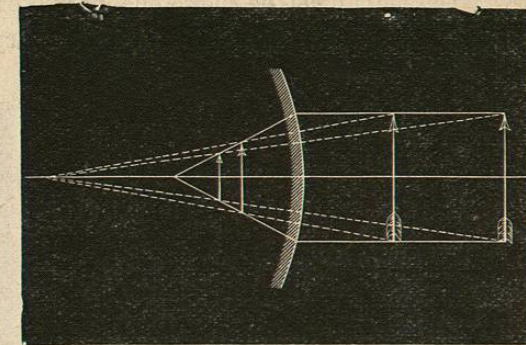


Fig. 455.—Espejo convexo. Imagen recta y virtual

Cualquiera puede cerciorarse de esta circunstancia examinando una bola bruñida semejante á la representada en la figura 454. Por lo regular se coloca en los jardines esta clase de espejos esféricos (que son globos de cristal azogados interiormente, ó bien de cristal negro, llamados *globos periscópicos*), en cuya superficie se refleja todo el paisaje de alrededor.

También se hace mención en óptica de los espejos parabólicos cóncavos, que tienen la propiedad de concentrar los rayos paralelos al eje de la parábola en el foco de esta curva, cualquiera que sea la abertura del espejo, y que reflejan del mismo modo, en haces paralelos, toda la luz de un objeto luminoso situado en el foco.

Los espejos esféricos no dan este resultado sino cuando su abertura es muy pequeña.

Para resolver los diferentes problemas relativos á los espejos esféricos convexos ó cóncavos, es preciso

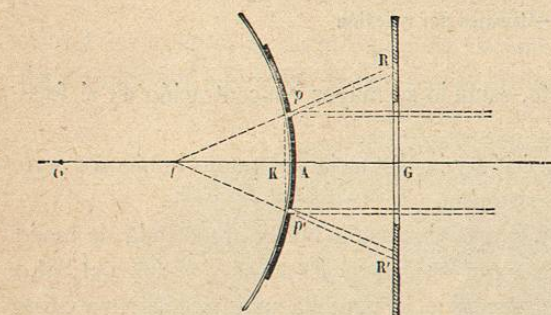


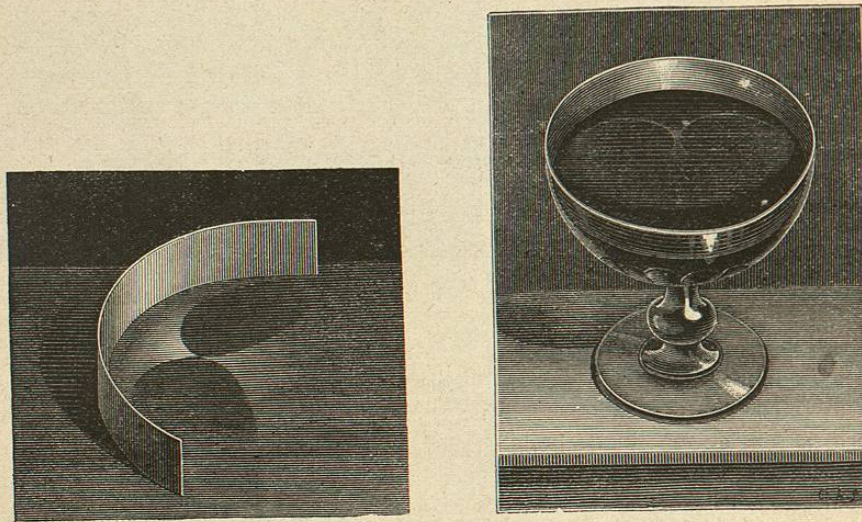
Fig. 456.—Determinación de la distancia focal de un espejo convexo

conocer su radio de curvatura, es decir, el radio de la esfera á que pertenecen. Ya se ha visto que este radio es el doble de la distancia focal; por consiguiente la cuestión se reduce á averiguar prácticamente la posición del foco, cosa fácil respecto de un espejo cóncavo, pues exponiéndolo á los rayos solares y recibiendo la imagen en una pantalla se encuentra en seguida la posición en la que esta imagen tiene las dimensiones más reducidas: entonces la distancia focal es la de la pantalla al espejo.

Si el espejo es convexo, se cubre su superficie con una hoja de papel negro en la que se han abierto previamente dos agujeros p y p' (fig. 456). Entonces se vuelve el espejo hacia el sol, y por medio de una pantalla que tenga una abertura conveniente

se busca la posición respecto de la cual el intervalo de las dos líneas R y R' de los haces reflejados por los puntos p y p' es doble que la distancia entre estos puntos. Entonces la distancia GA de la pantalla al espejo es igual á la focal, como facilmente se prueba en la figura citada por la comparación de los triángulos semejantes $F p p'$ y $F R R'$.

Cuando se examina cuál es, para un espejo esférico, la marcha de los rayos reflejados procedentes de un punto luminoso situado en el eje á cualquier distancia, reconócese que estos rayos se cortan sucesivamente, primero en los diferentes puntos del mismo eje y luego fuera de él, de suerte que los puntos de intersección forman una superficie que los geómetras llaman *cáustica*. La luz se acumula en todos los puntos de esta su-



Figs. 457 y 458.—Cáustica por reflexión

perficie más que en cualquiera otra parte, estando su mayor concentración en el foco del punto dado.

La cáustica varía de forma con la posición y la distancia del punto luminoso; pero es posible comprobar prácticamente su existencia.

Hácese uso con este objeto de una pantalla de cartón blanco, recortada de modo que reproduce la forma del espejo al pasar por su centro. Expuesta á la luz del Sol ó á la de una lámpara, se nota en ciertas partes de la pantalla una luz más viva cuyos contornos indican la forma de la cáustica, forma que es evidentemente la misma, cualquiera que sea la posición de la pantalla alrededor del centro. Una placa circular de metal, bruñida interiormente y puesta sobre un plano, indicaría del propio modo la forma de esta curva con respecto á un espejo cilíndrico (fig. 457). Bréwster fué quien ideó este experimento.

Cuando se expone á los rayos del sol un vaso lleno de leche, ó mejor aún, lleno de tinta, como dice J. Herschel, se ve en la superficie líquida una línea curva brillante con un punto de retroceso hacia el foco: este punto es la intersección de la cáustica del espejo cilíndrico cóncavo que forma el vaso con el plano que limita el líquido en la superficie superior (fig. 458).

VI

IMÁGENES EN LOS ESPEJOS CILÍNDRICOS Y CÓNICOS - ANAMORFOSIS

Los espejos cilíndricos convexos ó cóncavos producen imágenes en las que no aparecen alteradas las dimensiones de los objetos en el sentido de la longitud del cilindro ó de sus aristas, pero que en cambio sufren una mudanza en una dirección perpendi-

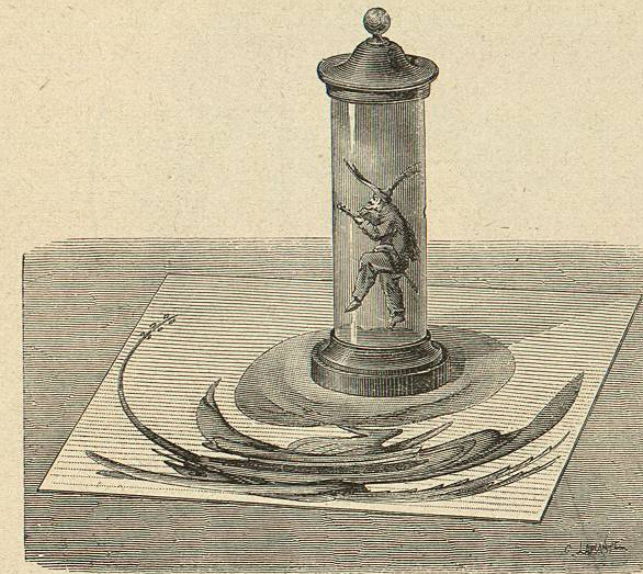


Fig. 459.—Espejo cilíndrico. Anamorfosis

cular á la primera, es decir, según las circunferencias de las secciones normales. Los rayos reflejados á lo largo de una misma arista ó generatriz siguen la marcha que em-

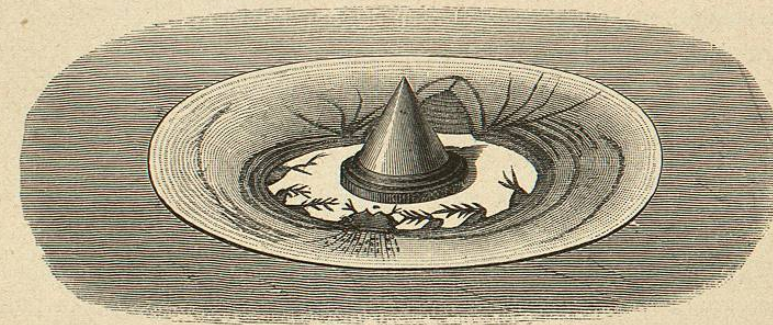


Fig. 460.—Reflexión en los espejos cónicos. Anamorfosis

prenderían en un espejo plano; los que se reflejan en la circunferencia misma van por el rumbo que les haría tomar la reflexión en un espejo esférico. Si el cilindro es convexo, la imagen se estrechará; si cóncavo, tan pronto aparecerá más estrecha como más ancha, según la distancia del objeto al espejo.

Las imágenes producidas por reflexión en los espejos cónicos convexos se deforman en el sentido de las circunferencias, y como el grado de curvatura cambia de la

base al vértice, resulta que las dimensiones sufren una depresión lateral tanto mayor cuanto más cerca estén del vértice. Si la superficie cónica fuese cóncava, la forma de la imagen sería piramidal, pero en ciertas posiciones del objeto sería ensanchada.

En todos estos espejos la reflexión de los rayos luminosos se efectúa siempre con arreglo á las leyes que hemos consignado: de suerte que se han podido hacer dibujos

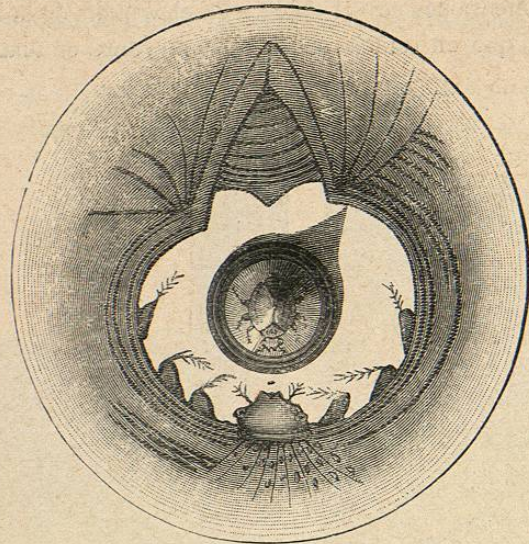


Fig. 461.—Reflexión en los espejos cónicos. Anamorfosis

raros y disformes, en los que no se discierne forma alguna determinada y que, sin embargo, al reflejarse en espejos cilíndricos y cónicos, presentan una imagen que es representación exacta de algún objeto conocido. Dase el nombre de *anamorfosis* á esta inversión de formas.

En las tiendas de objetos de óptica ó de quincalla se venden cuadros cuyas líneas y colores se han combinado para producir imágenes regulares de paisajes, de personajes, de animales, etc., cuando se pone en el centro del cuadro el espejo cilíndrico ó cónico, para el cual se han trazado (figs. 459, 460 y 461).

VII

LUZ REFLEJADA CON IRREGULARIDAD Ó LUZ DIFUSA

Hasta aquí tan sólo nos hemos ocupado de la luz reflejada con regularidad en la superficie de los cuerpos pulimentados, y los fenómenos que origina esta reflexión demuestran suficientemente, según dejamos dicho, que si el grado de pulimento fuese perfecto, el cuerpo reflector sería invisible para nosotros: se vería la imagen más ó menos deformada de los objetos luminosos que rodean á dicho cuerpo, pero sin ver á éste. Y si todos los cuerpos se hallasen en el mismo caso, á excepción de los focos de luz, el ojo no divisaría más que una muchedumbre infinita de imágenes de cuerpos luminosos, por ejemplo del Sol, sin ver otra cosa. Si en una cámara oscura se dirigen los rayos solares hacia un espejo, la superficie de éste da una imagen deslumbradora del Sol, pero los demás puntos del cuerpo reflector son ligeramente visibles tan sólo á causa de la es-

casa fracción de luz que se refleja irregularmente en su superficie. Esta luz difusa es la que permite ver el espejo desde todos los puntos de la cámara oscura (1).

La proporción de luz especular y de luz difusa reflejada por un cuerpo varía, no tan sólo con el pulimento de la superficie, sino también con la naturaleza y color del cuerpo y además con el ángulo de los rayos incidentes. Una hoja de papel blanco mate refleja la luz en todas direcciones; pero su blancura es tanto más deslumbradora cuanto más perpendicularmente está expuesta al foco luminoso. Si el observador se coloca para examinar la superficie de la hoja en direcciones cada vez más oblicuas, la proporción de la luz difusa disminuye, y por lo tanto el brillo de la superficie. En cambio el ojo recibe rayos más y más numerosos reflejados regularmente, de suerte que poniendo la llama de una bujía muy cerca de la superficie de una hoja de papel, y observándola oblicuamente en dirección opuesta, se ve una imagen muy distinta de la llama, reflejada como en un espejo (fig. 462).

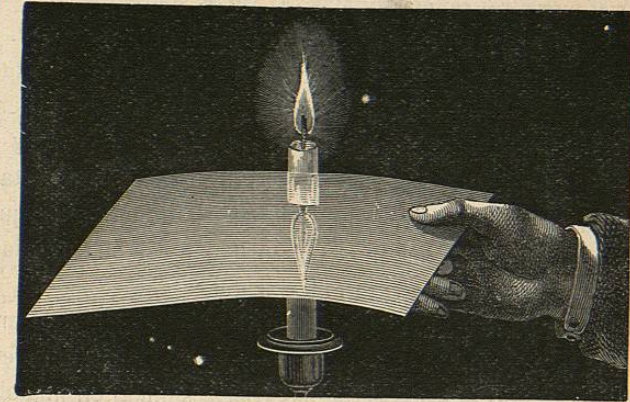


Fig. 462.—Luz reflejada con mucha oblicuidad

Al decir que la luz difusa es la luz reflejada irregularmente, esto no significa que los rayos de que se compone sigan al reflejarse otras leyes que la luz especular.

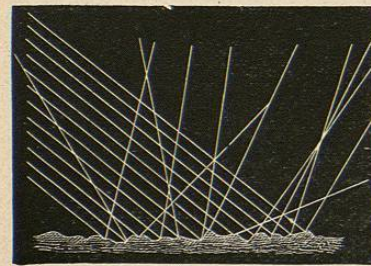


Fig. 463.—Reflexión irregular de la luz en la superficie de un cuerpo no bruñido

La irregularidad á que nos referimos procede de las asperezas de la superficie de los cuerpos mates, rugosos, que reciben la luz con distintas incidencias y los reflejan en todas direcciones (fig. 463). Cuando se mira con mucha oblicuidad semejante superficie, las asperezas se ocultan unas á otras y crece el número de los rayos emanados de elementos paralelos á la dirección general de la superficie, lo cual explica la proporción creciente de la luz reflejada con regularidad.

No es dudoso que la cantidad de luz reflejada especularmente varíe con el estado de la superficie de los cuerpos. Un trozo de cristal terso se convierte en un espejo, pero deslustrado; casi no refleja más que luz difusa. En el mismo caso se hallan la madera pulimentada, el mármol, el asta, y otra porción de substancias. Pero el *poder reflector*, aplicando este nombre á la propiedad

(1) Por consiguiente, un cuerpo no luminoso por sí mismo se hace visible merced tan sólo á la luz difusa que su superficie refleja por todas partes. Sin embargo, más adelante veremos que hay un gran número de substancias que tienen la propiedad de emitir luz propia, cuando se las expone á los rayos de un foco luminoso más ó menos intenso; tales son las substancias llamadas fosforescentes. Quizás disfruten todos los cuerpos de la misma propiedad en grados muy diferentes, de suerte que tal vez deban su visibilidad en parte á la fosforescencia, y en parte también á la difusión de la luz.

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*.

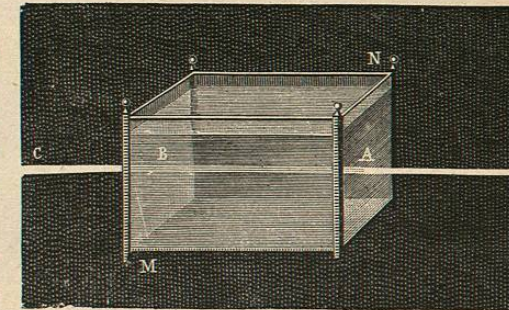


Fig. 464.—Incidencia normal; falta de desviación

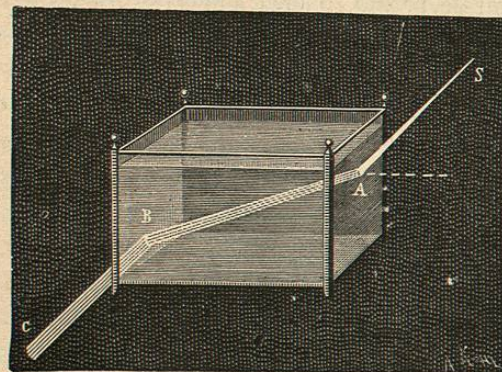


Fig. 465.—Incidencia oblicua. Refracción

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