

IV

IMÁGENES MÚLTIPLES PRODUCIDAS POR COMBINACIONES DE ESPEJOS

Colocando dos ó muchos espejos planos de varios modos resultan efectos singulares, ocasionados por las reflexiones múltiples que se producen de uno á otro espejo.

El más sencillo de estos efectos de reflexión es el que dan dos espejos planos paralelos. Un objeto luminoso interpuesto entre ambos da origen en cada uno de ellos á una primera imagen que, convirtiéndose á su vez en objeto luminoso para los demás espejos respectivamente—ó que por lo menos puede ser considerado como tal á causa de las leyes de la reflexión,—engendra dos nuevas imágenes más lejanas que las primeras. Estas forman á su vez otras nuevas, y así indefinidamente, de suerte que el ojo situado convenientemente ve una infinidad de imágenes que en realidad son cada vez más débiles á causa de las pérdidas que hacen sufrir á la luz estas reflexiones sucesivas. Fácil es observar dichos efectos en una sala donde haya dos espejos paralelos. Las dos series de imágenes se confunden en ellos fácilmente cuando se trata de un punto luminoso; pero si se tiene empeño en distinguirlos, basta mirar un

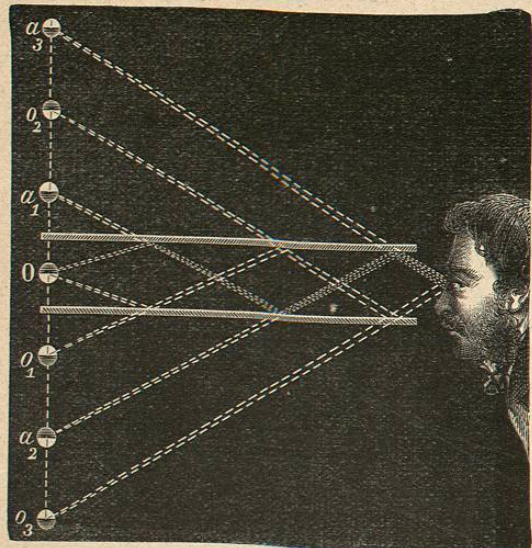


Fig. 437.—Reflexión en dos espejos planos paralelos: imágenes múltiples de un objeto situado entre ellos

espejos paralelos. Las dos series de imágenes se confunden en ellos fácilmente cuando se trata de un punto luminoso; pero si se tiene empeño en distinguirlos, basta mirar un

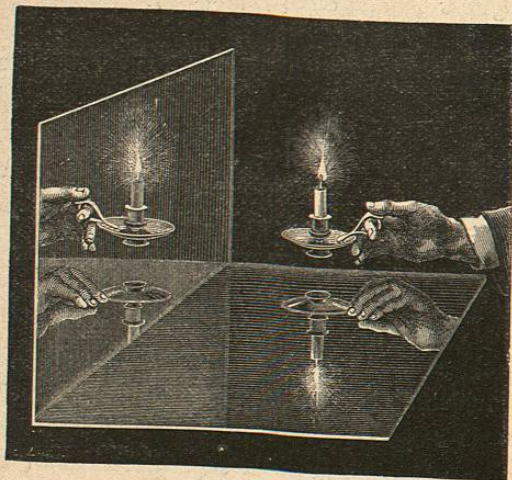


Fig. 438.—Imágenes múltiples en dos espejos que forman ángulo recto

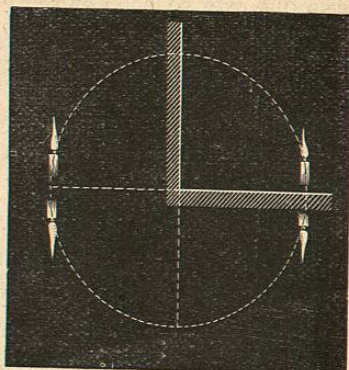


Fig. 439.—Espejos en ángulo recto

objeto cuyas caras sean de colores ó formas diferentes. Así por ejemplo, á una persona situada entre los dos espejos y delante de uno de ellos se la verá alternativamente de frente ó de espalda en cada uno de ellos.

Dos espejos planos que formen ángulo dan imágenes cuyo número es limitado y depende de la dimensión de la abertura de dicho ángulo; pero todas se hallan situadas en un círculo que tiene por centro un punto de la línea de intersección de los espejos y por radio la distancia del punto luminoso. Las figuras 438 y 439 reproducen las tres

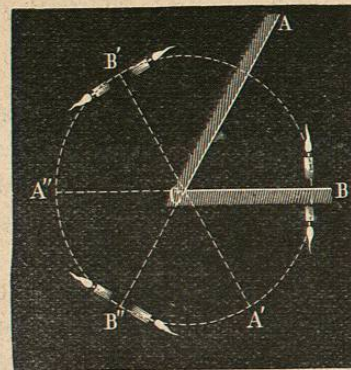


Fig. 440.—Espejos en ángulo de 60°

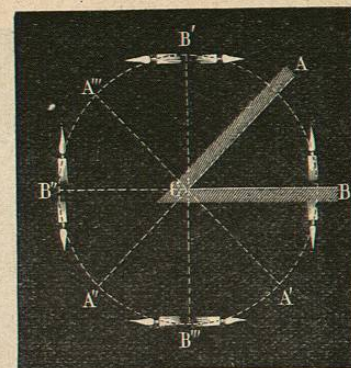


Fig. 441.—Espejos en ángulo de 45°

mágenes formadas por dos espejos inclinados 90°. En las dos siguientes figuras (440 y 441) vese cómo se eleva el número de imágenes á cinco ó siete, según que los dos espejos estén respectivamente inclinados 60° ó 45°.

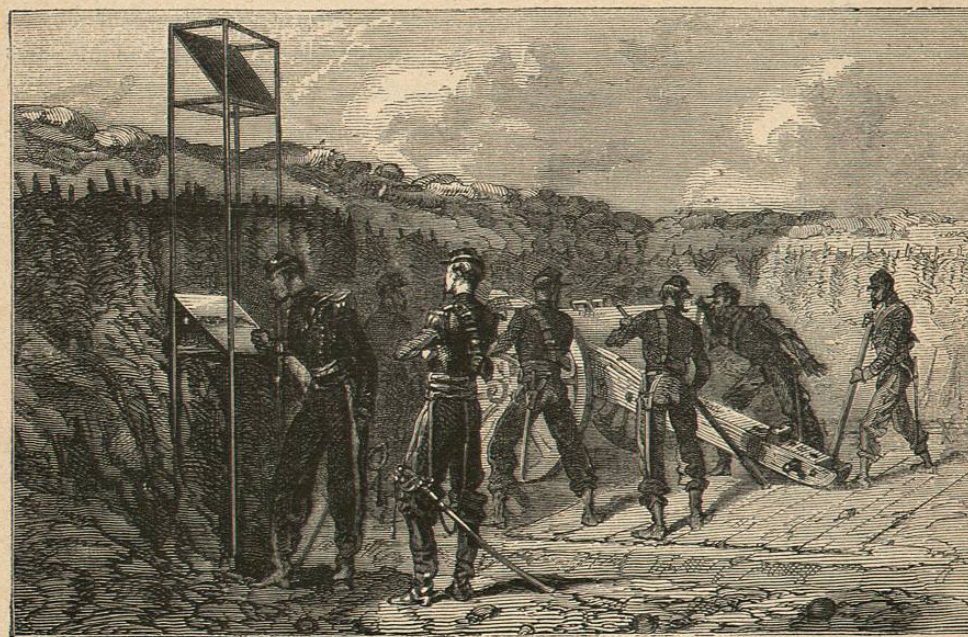


Fig. 442.—Polemoscopio

El *espejo mágico* no es más que una combinación de dos espejos planos inclinados de modo que reflejan las imágenes de los objetos separados por algún obstáculo de la vista del espectador. Se le ha utilizado con el nombre de *polemoscopio* para observar en un asedio los movimientos exteriores del enemigo, estando el observador resguardado detrás de un parapeto. El polemoscopio representado en la figura 442 está formado

sencillamente por dos espejos paralelos inclinados 45° con relación al horizonte y que pueden subir y bajar por dos correderas. El más elevado da frente á la región que desea explorar el observador, reproduciéndose en el más bajo la imagen de esta región, imagen que llega así al ojo después de dos reflexiones sucesivas.

Hoy se da el nombre de espejos mágicos á unos espejos de origen japonés ó chino que describiremos al tratar de las *Aplicaciones de la óptica*.



Fig. 443.—Imágenes simétricas formadas en el kaleidoscopio

Las reflexiones múltiples entre los espejos inclinados han sugerido la construcción de varios instrumentos ó aparatos, entre los cuales haremos mención del *kaleidoscopio*, inventado por Bréwster.

Colócanse en un tubo de cartón tres tiras de espejo de modo que formen un prisma equilátero, cuya base está cerrada por dos plaquitas paralelas, una de ellas de cristal transparente y la otra de cristal raspado, entre las cuales se colocan objetos pequeños, como, por ejemplo, pedacitos de cristal de varios colores. Mirando por el extremo menor de esta

especie de anteojo, se ven directamente estos trozos de cristal, cuyas múltiples imágenes se forman por reflexión en los tres espejos, resultando de aquí figuras irregularmente

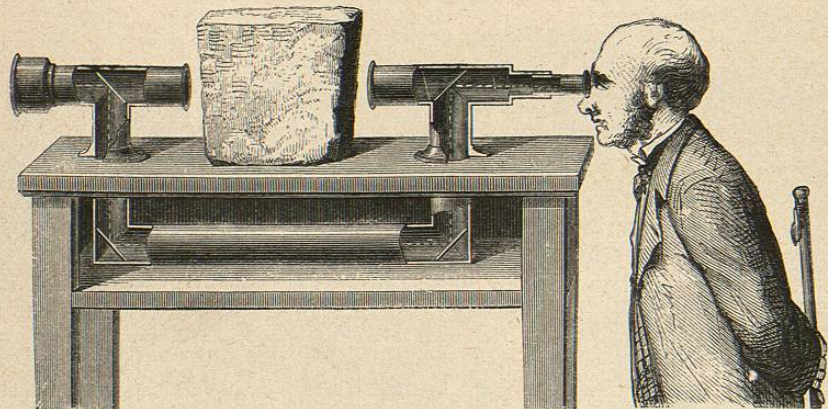


Fig. 444.—Anteojo mágico

dispuestas que se pueden variar como se quiera, para lo cual basta dar vueltas al instrumento sobre su eje, haciendo así que cambien de posición los fragmentos de cristal coloreados (fig. 443).

En el kaleidoscopio primitivo de Bréwster sólo había dos espejos, dándose por lo regular el nombre de *caja catóptrica* al instrumento de este género que contiene tres ó más.

Hace pocos años se ponía en el muelle del Louvre un individuo que enseñaba á los espectadores asombrados la fachada del Instituto á través de un enorme adoquín. El

anteojo mágico que de tal suerte permitía á los ojos ver al través de los cuerpos opacos se componía de dos tubos separados por el adoquín; pero estos dos tubos estaban reunidos por otro doblemente acodado que contenía cuatro espejos planos inclinados 42° , como se ve en la figura 444, y por consiguiente los rayos luminosos podían seguir esta línea mixta y salvar el obstáculo hasta llegar al ojo.

V

IMÁGENES EN LOS ESPEJOS CURVOS. — ESPEJOS ESFÉRICOS CÓNCAVOS Y CONVEXOS

Cuando la luz, en vez de reflejarse en una superficie plana, da en una superficie curva pulimentada, las leyes de su reflexión continúan siendo las mismas para cada punto del espejo, es decir, que los ángulos de reflexión y de incidencia son siempre iguales á uno y otro lado de la perpendicular al plano tangente á este punto, ó como se dice, de la normal á la superficie del punto de incidencia; además, el rayo incidente, el reflejado y la normal están en un mismo plano. Pero la curvatura de la superficie modifica la convergencia ó divergencia de los haces luminosos que después de la reflexión vienen á herir el ojo; esto da origen á fenómenos particulares de los objetos luminosos y de la formación de las imágenes, cuyas distancias y posiciones varían con la forma de los espejos y según las dimensiones y distancias de los objetos.

Estudiemos primeramente los fenómenos de esta clase originados por la reflexión de la luz en la superficie de los espejos de forma esférica.

Una esfera metálica hueca, en la cual se corte por un plano un casquete de cierta extensión, da un espejo esférico *cóncavo*, si la superficie cóncava es la pulimentada, y *convexo* si lo es la superficie exterior. Si el fragmento esférico es un trozo de cristal azogado, la capa de azogue es exterior para un espejo cóncavo, é interior para uno convexo.

Pero ya hemos indicado por qué es preferible emplear los espejos de metal ó de cualquier otra substancia opaca y bruñida para la observación de los fenómenos. No hablaremos por tanto de los demás, que no diferirían de los primeros sino por la producción de imágenes múltiples, acerca de lo cual bastará recordar lo anteriormente expuesto sobre las imágenes múltiples producidas por las dos superficies reflectoras de las lunas azogadas.

Veamos lo que sucede cuando se presenta un objeto luminoso, verbigracia la llama de una bujía, á diferentes distancias de un espejo cóncavo. En estos experimentos suponemos que se coloca el punto luminoso en el *eje de figura* del espejo, es decir, en la línea indefinida que reúne el centro de la esfera á la cual pertenece con el punto medio ó vértice del casquete esférico.

Coloquemos ante todo la bujía á una distancia del espejo algo mayor que el radio de curvatura. Mediante una pantalla translúcida que reciba los rayos reflejados será fácil ver que se forma una imagen invertida del objeto, y más pequeña que él, en un punto del eje comprendido entre el centro de la esfera y la mitad del radio (fig. 445). Alejando del espejo el punto luminoso, será preciso para recibir la imagen acercarse progresivamente la pantalla al punto llamado foco principal del espejo (pronto veremos por qué), y entonces se advierte que la imagen, siempre invertida, disminuye cada vez más. Si se acerca de nuevo la bujía por la misma línea seguida al alejarla, esto es, desde su posición actual hacia el centro, se observa que la imagen, siempre invertida y más

pequeña que el objeto, va creciendo más y más conforme se aproxima al centro. Si la bujía llega hasta éste, la imagen llega al propio tiempo y se confunde con ella en posición y en tamaño,

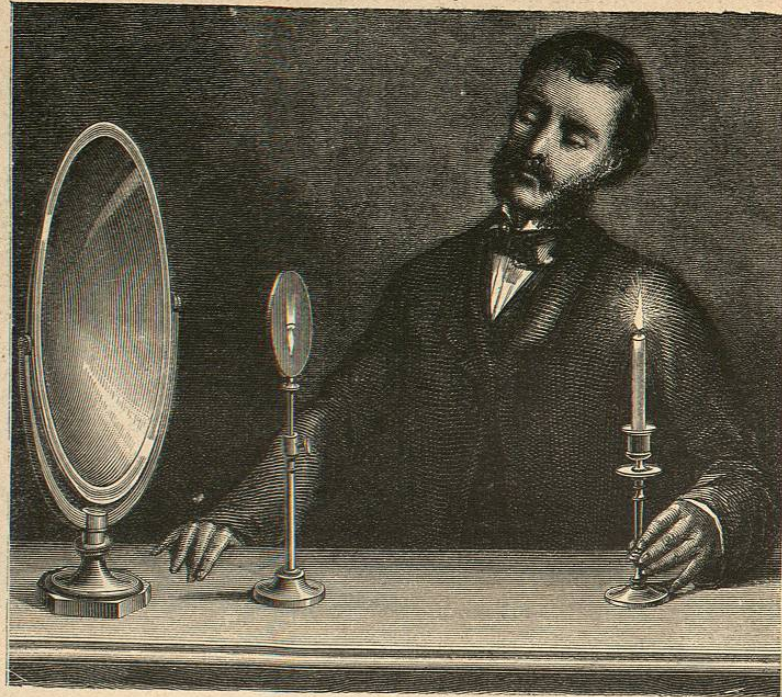


Fig. 445.—Espejo cóncavo: imagen invertida, menor que el objeto

Prosigamos ahora acercando la bujía al espejo, y veremos que la imagen pasa más allá del centro y se aleja cada vez más de él aumentando sin cesar y siempre invertida

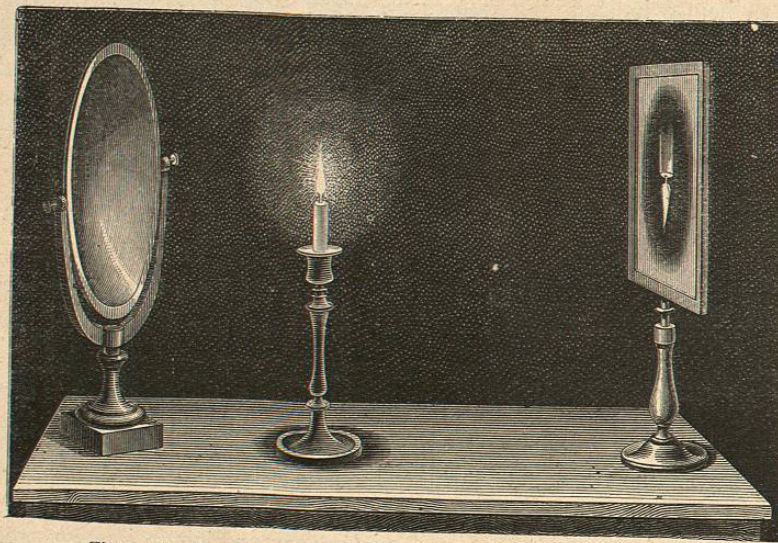


Fig. 446.—Espejo cóncavo: imagen invertida, mayor que el objeto

(fig. 446). A medida que el objeto se acerca al foco principal, la imagen crece alejándose por el eje, pero más difusa, y en breve no es ya posible recibirla en la pantalla. Cuando la bujía llega al foco, la imagen se ha disipado completamente.

Hasta aquí, la imagen del objeto luminoso ha sido siempre real, es decir, que existen realmente en el aire, en el punto en que se forma, haces luminosos cuya reunión reproduce materialmente, por decirlo así, la forma y el color del objeto; así es que hemos podido recibir esta imagen en una pantalla. Pero no sucede lo propio si se acerca el objeto luminoso al espejo á menor distancia que el foco principal. Entonces ya no existe imagen real, sino que el ojo ve detrás del espejo, como en los espejos planos, una imagen de la bujía, á la cual se da el nombre de *imagen virtual*. Es recta, mayor que el objeto, como se representa en la figura 447; además, sus dimensiones aparentes disminuyen á medida que se acerca la bujía al espejo, y aun tendría las del objeto mismo si éste tocase la superficie reflectora.

Fácilmente se pueden observar estos fenómenos con los espejos cóncavos de uso doméstico, y cuya curvatura está calculada de tal suerte que á corta distancia del espejo se encuentra el observador en la última de las posiciones descritas en el experimento anterior: en este caso ve su rostro más ó menos agrandado. Si el observador se aleja á mayor distancia, verá entonces cómo se reproducen los fenómenos indicados, aunque en sentido contrario.

Veamos ahora cómo nos explican las leyes de la reflexión de la luz las principales circunstancias que caracterizan los fenómenos cuya descripción acabamos de hacer.

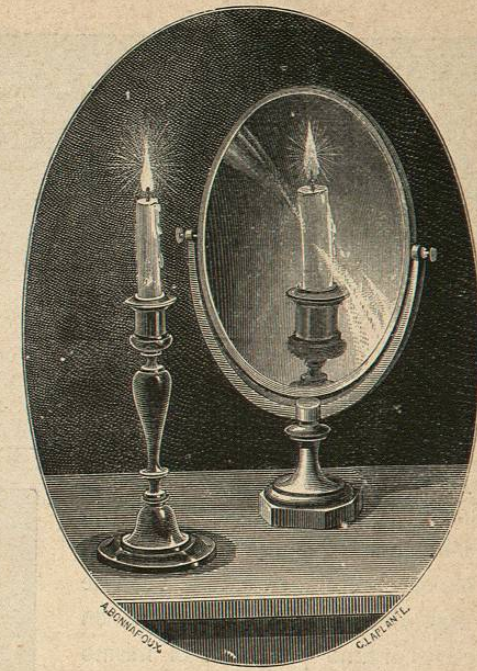


Fig. 447.—Espejo cóncavo: imagen virtual, recta y mayor que el objeto

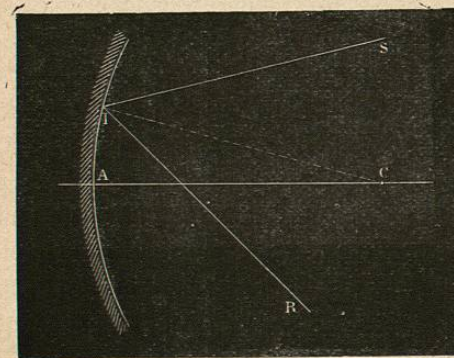


Fig. 448.—Marcha de un rayo luminoso en la superficie de un espejo cóncavo

Para esto, empecemos por determinar la marcha de un rayo luminoso que caiga y se refleje en la superficie de un espejo cóncavo. Pueden ocurrir dos casos: ó el rayo incidente pasa por el centro de curvatura del espejo, ó pasa á cierta distancia de él. En el primer caso la incidencia es normal y el rayo reflejado debe serlo también, es decir, el rayo de luz vuelve por el mismo camino que trajo, sigue después de la reflexión la marcha que antes llevaba, y vuelve de nuevo al espacio pasando por segunda vez por el centro. En el segundo caso, sea C el centro del espejo y SI el rayo incidente (fig. 448). Si trazamos el radio de la esfera IC, ocurrirá la reflexión en el plano SIC, puesto que este plano es normal al espejo: por otra parte, la dirección del rayo reflejado IR será tal, que habrá igualdad entre los dos ángulos SIC y CIR.

Bastan estas dos reglas para averiguar las posiciones relativas de todos los rayos ó haces luminosos incidentes y reflejados, sea la que quiera, por otra parte, su situación respecto del espejo.

Por ejemplo, la figura 449 nos muestra un haz de luz formado de rayos paralelos á un eje principal CA del espejo cóncavo, lo que equivale á suponer que estos rayos emanan de un punto luminoso situado en el eje á una distancia infinita, ó por lo menos bastante grande para que pueda considerársela tal. Esto ocurre con la luz que llega del Sol, de las estrellas ó también de un objeto suficientemente apartado con relación al radio de curvatura del espejo.

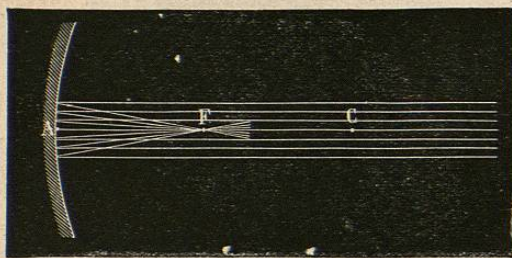


Fig. 449.—Espejo cóncavo: marcha y reflexión de los rayos paralelos al eje. Foco principal

La geometría y la observación demuestran de consuno que todos los rayos reflejados cortan el eje principal en un mismo punto, situado á igual distancia entre el centro C y el vértice A del espejo. Su reunión produce en F, foco principal, una imagen del punto que percibiría el ojo en el mismo sitio, toda vez que el haz divergente que penetra en nuestro órgano producirá el mismo efecto que si un objeto luminoso real, situado en el foco, nos enviase el haz mismo. El fenómeno de que hablamos se efectúa con tanta mayor exactitud cuanto más pequeña es la abertura del espejo, es decir, que el ángulo del cono que tiene su vértice en el centro C del espejo y por base el espejo mismo sea de menor valor: en realidad el ángulo no debe pasar de 8 á 10 grados.

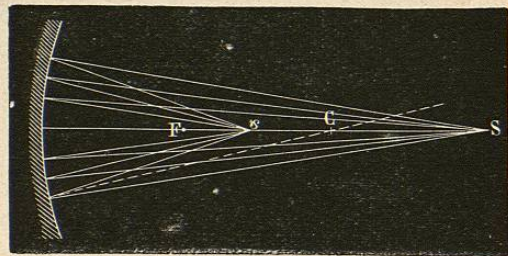


Fig. 450.—Espejo cóncavo: focos conjugados

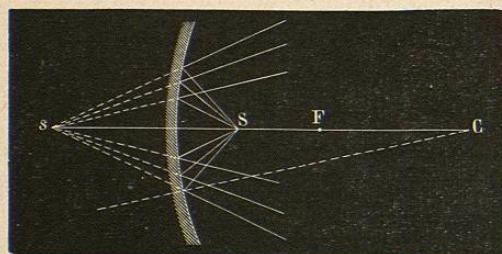


Fig. 451.—Espejo cóncavo: foco virtual

como el foco principal, á igual distancia entre el centro y el espejo.

Las figuras 451 y 452 representan la marcha de los rayos, cuando el punto luminoso está situado en el eje, á una distancia del espejo que no es infinita. En esta hipótesis, el haz luminoso está formado de radios que ya no son paralelos y que dan en el espejo formando varios ángulos con su superficie. Aquí pueden presentarse tres casos, según que el punto luminoso esté más allá del centro del espejo, entre el centro y el foco, ó bien entre éste y el espejo.

Por lo demás, siendo esférico el espejo, es una misma la curvatura en todos sus puntos; los rayos reflejados seguirán, pues, una marcha semejante respecto de los ejes secundarios, esto es, respecto de las líneas rectas indefinidas que unen cada uno de los puntos del espejo con el centro. De modo que hay un crecidísimo número de focos secundarios en estos ejes, situados,

Demuéstrase geoméricamente en todos estos casos que los rayos reflejados convergen en un mismo punto del eje principal, donde se reúnen formando un haz, y que este punto es precisamente aquel en el cual se formaban las imágenes, según nos lo ha hecho ver el experimento.

Por ejemplo, si el punto luminoso está en S (fig. 450) más allá del centro del espejo, se refleja en I un rayo SI y corta el eje entre el centro y el foco; los demás rayos, después de reflejarse, van á pasar por el mismo punto s, donde forman una imagen del punto S. Si este último llega al centro mismo, los rayos caen verticalmente sobre el espejo, y al reflejarse vuelven por el camino que primeramente seguían; el punto luminoso y su foco se confunden en el centro del espejo. Si el punto se acerca al espejo, pero á menor distancia que el foco principal, la reflexión se efectúa en el eje más allá del centro.

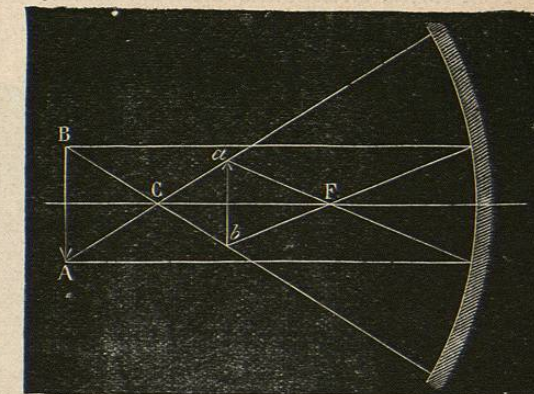


Fig. 452.—Espejo cóncavo: imágenes reales é invertidas de los objetos

Ocupémonos ahora del caso en que el punto luminoso está en s, entre el centro C y el foco principal (fig. 450); entonces es evidente que uno cualquiera de los rayos incidentes, sI, se reflejará en la dirección IS, y que los demás cortarán el eje en el mismo punto S, donde tendrá efecto la convergencia. La imagen de un punto situado entre el centro del espejo y el foco principal resultará, pues, en el eje más allá del centro; y así lo confirma la experiencia, según hemos visto anteriormente.

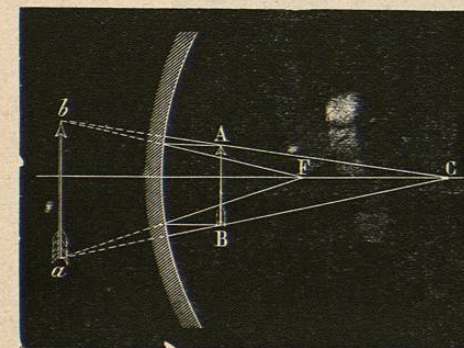


Fig. 453.—Espejos cóncavos: imagen recta y real de los objetos

Este resultado prueba—y así podía preverse—que si un haz incidente que parta de un punto del eje S produce un haz reflejado que converge en otro punto del eje s, otro haz incidente emanado de este último punto convergerá á su vez, después de reflejarse en el espejo, precisamente en el punto de partida del

primer haz. En una palabra, el camino recorrido en un sentido por un rayo de luz que da en un punto del espejo y se refleja en él, lo recorre en dirección enteramente opuesta otro rayo de luz que da en el mismo punto, si la dirección de incidencia del segundo rayo coincide con la dirección de reflexión del primero.

Así pues, los dos puntos S y s son alternativamente focos uno para otro, y por esta razón se los llama *focos conjugados*. El foco conjugado del foco principal llega á lo infinito, lo que equivale á decir que los rayos emanados de este punto van á parar paralelamente al eje del espejo.

Cuando el punto luminoso S está entre el foco y el centro del espejo, se refleja en