

métricamente de la ley de formación de las imágenes en los espejos planos. Empezaremos pues por estudiar esta última ley, y demostraremos que los resultados de la observación son idénticos á los que nos da el raciocinio. Pero antes, digamos una palabra acerca de las diferentes clases de espejos.

Se debe considerar como *espejo plano* toda superficie reflectora plana y tersa, ya sea sólida, líquida ó gaseosa la materia que la forma; mas ante todo sólo nos ocuparemos de los fenómenos de reflexión en la superficie exterior, distinción á la verdad inútil si se trata de espejos planos constituidos por una placa metálica bruñida todo lo posible por un procedimiento industrial cualquiera, ó tambien por otro cuerpo opaco susceptible de pulimento, como el mármol, la madera lisa y barnizada, etc. Los espejos propiamente dichos consisten en una luna de caras paralelas en cuya superficie posterior se ha dado una delgada capa de una amalgama de estaño (aleación de estaño y azogue). La ventaja de estos espejos está en la inalterabilidad de la capa metálica reflectora protegida por el cristal, al paso que los espejos metálicos (acero, bronce, plata) se empañan rápidamente por la acción oxidante del aire, del vapor de agua ó de los gases que siempre hay en el aire. Pero los espejos azogados tienen otro inconveniente, el de que dan imágenes dobles y aún múltiples de los objetos, y que se confunden en parte entre sí, careciendo por lo tanto de la limpieza que presenta una sola imagen. La superficie exterior y tersa del cristal es á su vez un espejo que refleja una parte de la luz incidente, otra parte se difunde por dicha superficie, y la que llega á la capa azogada después de haber sido refractada una vez en el interior del cristal, se refracta y refleja otra vez, de suerte que solamente una fracción de la luz total llega al ojo para producir en él la sensación de la imagen principal. Más adelante tendremos ocasión de tratar de nuevo de estas imágenes múltiples.

Las superficies de los líquidos en reposo forman tambien espejos naturales, y por esto un baño de azogue (líquido no trasparente) puede asimilarse á un espejo metálico. El agua y los demás líquidos límpidos envían á los ojos una escasa porción de la luz incidente, á no ser

que el ángulo que forman los rayos con la superficie sea muy pequeño. El resto penetra en el interior del líquido refractándose en él, quedando absorbido en su mayor parte tan luego como el espesor es un poco considerable.

Las superficies de separación de los gases de densidades desiguales son tambien reflectoras, y ya veremos que ciertos fenómenos naturales se explican en parte por esta propiedad.

Pasemos á las imágenes dadas por un espejo plano, prescindiendo de la clase de materia que lo constituye.

La observación diaria más elemental nos muestra en una luna ó espejo la imagen exacta del objeto puesto ante él. Las dimensiones parecen idénticas á las del objeto, ó mejor dicho, estas dimensiones son las mismas con que aparecería el objeto si estuviera situado detrás del espejo, á una distancia de su plano precisamente igual á la que ocupa delante del espejo. Además, las posiciones relativas de las diferentes partes de este ó de los objetos entre sí son lo contrario de las posiciones reales: la derecha de la imagen es la izquierda del objeto y recíprocamente. Estas diferentes condiciones se resumen en una ley cuyo enunciado geométrico es muy sencillo:

En todo espejo plano, la imagen es simétrica del objeto.

Consideremos un haz luminoso enviado por la punta de la llama de una bujía (fig. 27) sobre un espejo plano. Los rayos de que se compone divergen en todos sentidos después de reflejarse en la superficie del espejo; pero la igualdad de los ángulos de incidencia y de reflexión hace que todos los rayos se reúnan detrás del espejo en un mismo punto, simétricamente situado respecto del plano del espejo y del extremo de la bujía de donde emana el haz. En una palabra, este último punto y su imagen están situados á igual distancia del plano del espejo y en la perpendicular á este plano. Para el ojo que recibe el haz divergente, parecerá que el objeto luminoso está situado en el punto de convergencia, y en él verá la imagen. Sea, pues, la que quiera la posición del observador delante del espejo, la de la imagen no variará, aunque parezca que ocupa puntos distintos en el espejo.

El extremo inferior de la bujía formará su

imagen del propio modo, y lo mismo ocurre con todos los puntos intermedios, de donde se deduce que la imagen de un objeto luminoso cualquiera estará formada, punto por punto, por todas las imágenes parciales simétricamente colocadas detrás del espejo, á distancias de su superficie iguales á las distancias particulares de cada uno de los puntos del objeto. Véase claramente por esto que la imagen producida por la reflexión de la luz que un objeto envía á la superficie de un espejo plano, no tiene nada de objetivo ó real: y esto es lo que se llama imagen *virtual*, forma ó representación que no existe más que para la vista. Pronto veremos en qué circunstancias pueden formarse por vía de reflexión *imágenes reales* de los objetos.

Un espejo plano puede reproducir la imagen de un objeto, sin que para ello sea preciso que éste se halle enfrente de aquél: bastará que el ojo esté colocado de modo que reciba los rayos reflejados, esto es, en el espacio divergente QMM'P (fig. 28) comprendido entre los rayos extremos emanados del objeto que van á reflejarse en el contorno del espejo. Este espacio constituye el *campo* del espejo con relación al objeto.

Es muy raro que la forma y el color de los objetos reflejados no sufran alguna alteración en los espejos ordinarios, lo cual consiste en que es muy difícil conseguir una tersura perfecta y superficies rigurosamente planas. La luz difusa se mezcla entonces con la reflejada especularmente, y la comunica una coloración propia de la sustancia de que está formado el espejo. En las lunas azogadas se observa tambien que los objetos forman una imagen doble: una, mucho más débil, la de la superficie exterior del espejo; otra, que es la más brillante, el espejo propiamente dicho, es decir, la superficie interna del azogue. Los espejos metálicos no tienen este inconveniente, pero ya hemos visto que presentan otros mayores: la cantidad de luz que reflejan es ménos viva y su superficie se empaña rápidamente al contacto del aire.

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 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 ménos 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 distinguirlas, basta mirar un 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 29 y 30 reproducen las tres imágenes formadas por dos espejos inclinados 90°. En las dos figuras siguientes véase cómo se eleva el número de imágenes á cinco ó siete, según que los dos espejos estén inclinados 60° ó 45°.

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 algun 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 fig. 31 está formado sencillamente por dos espejos

paralelos, inclinados 45° con relacion al horizonte y que pueden subir y bajar por dos correreras. El más elevado da frente á la region que desea explorar el observador, reproduciéndose en el más bajo la imágen de esta region, cuya imágen llega así al ojo despues 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*.

Las reflexiones múltiples entre los espejos inclinados han sugerido la construccion de varios instrumentos ó aparatos, entre los cuales haremos mencion del *Kaleidoscopio*, inventado por Brewster.

Colócanse en un tubo de carton tres tiras de espejo de modo que formen un prisma equilátero, cuya base está cerrada por dos plaquitas paralelas, una de ellas de cristal trasparente 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 ante-ojo, se ven directamente estos trozos de cristal, cuyas múltiples imágenes se forman por reflexion en los tres espejos, resultando de aquí figuras irregularmente dispuestas que se pueden variar como se quiera, para lo cual basta dar vueltas al instrumento sobre su eje haciendo así que cambien de posicion los fragmentos coloreados (fig. 32).

En el Kaleidoscopio primitivo de Brewster sólo habia dos espejos, dándose por lo regular el nombre de *caja catóptrica* al instrumento 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 adoquin. 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 adoquin; pero estos dos tubos estaban reunidos por otro doblemente acodado que contenía cuatro espejos planos inclinados 45° , como se ve en la fig. 33, 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, cae sobre una superficie curva pulimentada, las leyes de su reflexion continúan siendo las mismas para cada punto del espejo, es decir, que los ángulos de reflexion 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 despues de la reflexion vienen á herir el ojo; esto da origen á fenómenos particulares de los objetos luminosos y de la formacion de las imágenes, cuyas distancias y posiciones varían con la forma de los espejos y segun las dimensiones y distancias de los objetos.

Estudiemos primeramente los fenómenos de esta clase originados por la reflexion 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 extension, 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 sustancia opaca y bruñida para la observacion de los fenómenos. No hablaremos por tanto de los demás, que no diferirían de los primeros sino por la produccion 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 supondremos 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 traslúcida que reciba los rayos reflejados será fácil ver que se forma una imágen 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. 37). Alejando del espejo el punto luminoso, será preciso para recibir la imágen acercar progresivamente la pantalla al punto llamado foco principal del espejo (pronto veremos por qué) y entónces se advierte que la imágen, siempre invertida, disminuye cada vez más. Si se acerca de nuevo la bujía por la misma línea seguida al alejarla, esto es, desde su posicion actual hácia el centro, se observa

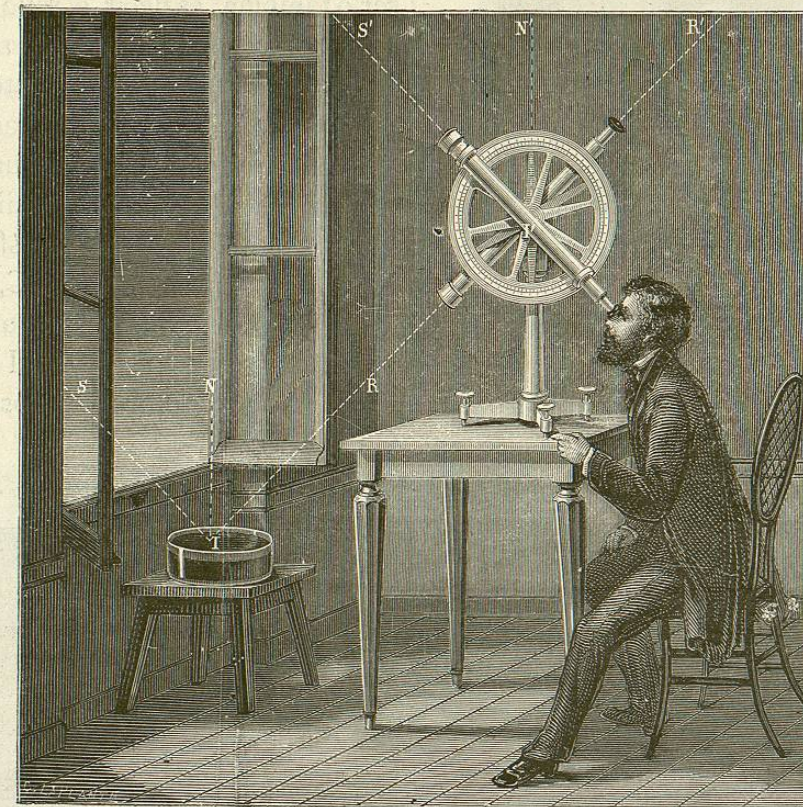


Fig. 26.— Estudio experimental de las leyes de la reflexion de la luz

que la imágen, 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 imágen llega al propio tiempo, y se confunde con ella en posicion y en tamaño.

Prosigamos ahora acercando la bujía al espejo, y veremos que la imágen pasa más allá del centro, y se aleja cada vez más de él aumentando sin cesar y siempre invertida (fig. 38). A medida que el objeto se acerca al foco principal, la imágen 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 imágen se ha disipado completamente.

Hasta aquí, la imágen del objeto luminoso ha sido siempre real, es decir, que existen realmente en el punto en que se forma,

haces luminosos cuya reunion reproduce materialmente, por decirlo así, la forma y el color del objeto; así es que hemos podido recibir esta imágen en una pantalla. Pero no sucede lo propio si se acerca el objeto luminoso al espejo á menor distancia que el foco principal. Entónces ya no existe imágen real, sino que el ojo ve detrás del espejo, como en los espejos planos, una imágen de la bujía, á la cual se da el nombre de *imágen virtual*. Es recta, mayor que el objeto, como se representa en la fig. 39; además, sus dimensiones aparentes disminuyen á medida que se acerca la bujía al espejo, y aún tendria las del objeto mismo si este tocara la superficie reflectora.

Fácilmente se pueden observar estos fenómenos con los espejos cóncavos de uso doméstico, y cuya curvatura está calculada de tal suerte