

remoto se halla el foco de donde emana, por cuya causa jamás vemos el cielo tal cual en sí es.

En el momento en que fijamos la mirada en una región sembrada de estrellas, las diferentes ondas luminosas que, hiriendo nuestra retina, nos producen otras tantas sensaciones distintas pareciendo que nos atestiguan la existencia actual de las estrellas de que emanan, son efectivamente mensajeros partidos de esos apartados mundos, pero mensajeros que han salido de ellos ha ya mucho tiempo, años, siglos, millares de años quizás. Las noticias que nos traen pertenecen á un tiempo pasado y nos informan, no del estado en que se encuentran las estrellas observadas, sino del que tenían al partir cada una de las ondas luminosas. Por esta razón ha podido decir Arago: "El aspecto del cielo en un momento dado nos refiere, por decirlo así, la historia antigua de los astros;" y por la misma causa hemos dicho en otra obra: "No vemos el cielo *tal como es*, sino como era; pero no como era en una época, sino en muchas épocas á la vez, en una infinidad de épocas dadas; de suerte que cada estrella podría anotarse con una fecha particular de la historia del cielo. Aquí, presenciamos el espectáculo de una nebulosa contemporánea de la época de Homero; allá, ese sol nos envía destellos que datan del tiempo de Pericles; la luz de la Cabra está en marcha desde nuestra gran epopeya revolucionaria de 1792 (esto lo escribíamos en 1862; hoy deberíamos decir desde los primeros años del siglo XIX), y así hasta lo infinito. ¡Espectáculo extraño, que abisma el pensamiento en la rareza de un hecho en el cual se confunden á la vez, sin contradicción para la razón, los tiempos y las distancias!,"

Es tal la importancia filosófica de un caso que parece tan nuevo cuando se piensa en él por vez primera, que para terminar este artículo citaremos las discretas líneas que Humboldt ha dedicado en su *Cosmos* á la misma idea.

Al hablar de los fenómenos de las estrellas efímeras, dicho autor añade:

"Todos estos hechos corresponden en realidad á épocas anteriores á aquellas en que los fenómenos de la luz los anunciaron á los habitantes de la Tierra; son como voces de lo pasado que llegan hasta nosotros. Hase dicho con verdad que, gracias á nuestros poderosos telescopios, podemos penetrar á la vez en el tiempo y en el espacio. Y en efecto, medimos el uno por el otro: una hora de camino equivale para la luz á un trayecto de 110 millones de miriámetros. Al paso que Hesiodo se valía en su *Teogonía* de la caída de los cuerpos para representar las dimensiones del Universo ("nueve días y nueve noches tardó en caer el yunque de bronce desde el cielo á la tierra,"), Herschel estimaba que la luz emitida por las últimas nebulosas visibles todavía en su telescopio de 40 pies debía invertir cerca de dos millones de años en llegar hasta nosotros. Así es que muchos fenómenos deben haber desaparecido largo tiempo antes de que hayamos podido percibirlos; y ha ya mucho tiempo que habrán ocurrido cambios que no vemos todavía.

Los fenómenos celestes no son simultáneos sino en apariencia, y aun cuando se quisiera colocar más cerca de nosotros las tenues manchas de nebulosas ó los cúmulos de estrellas, aun cuando se redujera á menor número el número de años que miden y marcan sus distancias, no por eso dejaría de ser la luz que han emitido y que llega hoy á nuestra vista, en virtud de las leyes de propagación, el testimonio más antiguo de la existencia de la materia.

Así es como la ciencia conduce al espíritu desde las más sencillas premisas á las ideas más elevadas, abriéndole esos campos surcados por la luz en "que germinan millones de mundos como la hierba de la noche."

CAPITULO IV

REFLEXIÓN DE LA LUZ

I

CONDICIONES DE VISIBILIDAD DE LOS CUERPOS. - FOCOS LUMINOSOS DIRECTOS

¿Cuáles son las condiciones exteriores de visibilidad de los cuerpos?

Consideremos ante todo un foco luminoso propiamente dicho. Si el medio interpuesto entre este foco y la vista es transparente y además homogéneo, puede decirse que la visibilidad es directa; y en efecto, el haz luminoso emanado de cada punto del foco sigue en este caso una línea recta. Esto resulta de la ley de propagación rectilínea de la luz, en la hipótesis de que el medio atravesado por ella sea homogéneo. Reconstituyendo geoméricamente las líneas rectas divergentes que constituyen los varios haces, se volvería á encontrar en su punto de convergencia el punto luminoso mismo.

Pero en breve veremos que no sucede lo propio cuando el espacio comprendido entre el ojo y el foco de luz está ocupado por uno ó muchos medios diferentes, aunque separadamente homogéneos. El camino seguido por cada haz es siempre rectilíneo en cada medio, mas por lo general sufre cierta desviación al pasar de uno á otro: el curso total, compuesto de una serie de líneas rectas, es entonces una línea mixta, cuyo último elemento marcará la dirección en que el ojo verá el punto luminoso. La imagen del foco resulta, pues, situada de distinto modo que cuando sólo hay un medio transparente; habrá sufrido una desviación, y á este fenómeno es al que se da el nombre de *refracción de la luz*.

Aquí suponemos que los medios atravesados por la luz están dotados de transparencia absoluta, en cuya hipótesis únicamente es visible el foco, pues el ojo no percibe la materia ó substancia de que se compone el medio, y ni ésta es siquiera visible.

Mas en realidad, y según dejamos dicho, la transparencia absoluta no existe en la Naturaleza, ó á lo sumo se la puede suponer en los espacios interplanetarios que no son inmediatamente accesibles á la observación. Los medios que conocemos, sólidos, líquidos y gaseosos, como el cristal, el agua y el aire, tienen tan sólo una transparencia relativa: absorben en parte la luz que los atraviesa, de lo cual resulta para ellos una iluminación más ó menos intensa, que crece con su espesor, y á menudo también cierto tono ó coloración que, siendo perceptible para nuestra vista, nos los hace visibles. La luz recibida de esta suerte, y que debemos distinguir de la que hace visible al foco, se llama luz transmitida. El medio percibido es visible por transparencia: de los que se hallan dotados de esta condición en mayor grado se pasa á los translúcidos y luego á los cuerpos ó medios opacos, por grados insensibles, por decirlo así. La luz de un foco se difunde así cada vez más por el interior del medio, de suerte que aquél acaba por no ser ya visible, al paso que los diferentes puntos del medio penetrados por su luz son, por el contrario, los únicos que la vista percibe. Por tal manera se llega á la opacidad tan luego como la absorción es completa, ó por lo menos desde que la intensidad de la luz transmitida es bastante débil para no causar impresión apreciable en el ojo.

Tales son las condiciones de visibilidad de un foco luminoso, es decir, de un cuerpo que es luminoso por sí mismo, ó bien por incandescencia ó de otro modo cualquiera. Veamos ahora lo que son respecto de los cuerpos que no son focos propiamente dichos.

En este caso, los cuerpos no son visibles sino cuando están iluminados, es decir, cuando su superficie recibe cierta cantidad de luz de cualquier foco. La observación demuestra entonces que, según la naturaleza del cuerpo y el estado de su superficie, una parte mayor ó menor de la luz recibida vuelve al medio del que emana, después de sufrir cierta desviación en su dirección primitiva. Esta variación de curso, este retroceso de los rayos luminosos sobre sí mismos ó siguiendo direcciones inmediatas, pero en el mismo medio del que habían partido, es lo que constituye el fenómeno de la *reflexión de la luz*.

Presentemos un ejemplo familiar. Pongamos una hoja de papel blanco y mate á la luz del día, ó á la de una lámpara ó una bujía, y veremos desde luego todos los puntos de la superficie del papel, cada uno de los cuales resultará iluminado, ó en otros términos, hará para nuestra vista las veces de un foco luminoso; si la masa de aire ó el medio diáfano que separa el papel del ojo es homogéneo, la marcha de los rayos luminosos que emanan del punto será rectilínea, lo propio que la seguida por el haz que, desde el foco, ha venido á dar en dicho punto. Apartando un poco la vista, se sigue viendo el punto de la misma manera; luego irradia en todos sentidos, y la única diferencia que se advierte es un cambio de intensidad que depende de la inclinación de la superficie con respecto á la línea recta que sigue la luz enviada al ojo.

Sustituyamos ahora la hoja de papel por cualquier otro objeto, pero de superficie mate también, es decir, que no sea brillante ni tersa. Este objeto será visible del propio modo. El color, la intensidad de la luz podrán variar considerablemente, pero con la circunstancia característica de que la luz estará siempre reflejada por cada punto en el medio diáfano circundante, y esto en todas las direcciones posibles. El ojo, situado en cualquier posición, seguirá viendo cada punto de la superficie del cuerpo, con tal de que no se interponga ningún obstáculo opaco en el trayecto rectilíneo de los rayos reflejados.

La luz reflejada de esta suerte por los cuerpos mates, rugosos, de superficie irregular, adquiere más particularmente el nombre de *luz difusa*.

Pero las cosas sucederán de distinto modo si ponemos delante del foco de luz, no ya una superficie mate, sino otra bruñida, una placa metálica, ó si se quiere, la superficie de un baño de azogue bien purificado. Nadie ignora que si se quiere hacer llegar á los ojos la luz reflejada por uno de los puntos de la superficie bruñida, se deben colocar en una posición particular, que varía con la del punto. La reflexión no resulta ya en todas direcciones alrededor de este punto, como sucede con la hoja de papel. Hay además otra diferencia esencial, consecuencia de la primera, y es que no toda la superficie del baño de azogue aparece iluminada á la vista, aunque ésta no varíe de posición; sólo lo está una porción limitada de ella, y cuya forma aparente es tal que reproduce idénticamente, por decirlo así, la imagen del foco, la llama de la bujía ó de la lámpara. La porción de la superficie que rodea esta imagen es comparativamente oscura, ó por lo menos no hace más que reflejar del mismo modo la imagen de los objetos más ó menos alumbrados que se hallan opuestos al baño de mercurio.

Así pues, hablando con propiedad, no es la superficie de los cuerpos bruñidos la que aparece visible cuando éstos reciben la luz emanada de cualquier foco, sino más bien el

foco mismo y los objetos iluminados por él. Esta superficie recibe entonces el nombre de espejo (1).

Por esta razón es preciso distinguir de la reflexión irregular ó difusa la reflexión especial de los cuerpos cuya superficie es más ó menos tersa; ésta se llama *reflexión especular* (del latín *speculum*, espejo); la primera toma el nombre particular de *difusión*. Vamos á estudiar primeramente los fenómenos de reflexión especular, por ser la ley que los rige muy sencilla y susceptible de una definición rigurosamente geométrica.

II

LEYES DE LA REFLEXIÓN ESPECULAR. — IGUALDAD DE LOS ÁNGULOS DE INCIDENCIA Y REFLEXIÓN DE LOS RAYOS LUMINOSOS

Mucho antes de que la industria humana, excitada por las necesidades de la higiene, del lujo y de la coquetería, hubiera pensado en bruñir los metales y el cristal, y en convertir sus superficies brillantes en otros tantos espejos y lunas, la Naturaleza nos presentaba ya ejemplos del fenómeno al que han dado los físicos el nombre de *reflexión especular de la luz*. La superficie de un agua tranquila y límpida, de un estanque ó de un lago, reproduce la imagen fiel del paisaje que la rodea, la bóveda azul del firmamento, las nubes, el Sol ó las estrellas, los árboles, las rocas, los seres animados que se pasean por sus orillas ó navegan por la superficie de la sábana líquida, y acaso no es este el modelo en grande escala que las artes industriales no han hecho más que copiar, y que hubiera bastado para estudiar, no diré cómoda, pero sí fielmente, la marcha que sigue la luz cuando, partiendo de los focos luminosos ó de los objetos alumbrados, viene á rebotar en la superficie de los cuerpos? Pero, como no sentimos la necesidad de estudiar sino después de la de admirar ó disfrutar, el descubrimiento de las leyes de la reflexión de la luz ha debido ser muy posterior á la imitación de los fenómenos que acabamos de describir.

Veamos, pues, qué leyes son éstas, y ocupémonos ante todo de la marcha seguida por un rayo luminoso que se refleja en un punto de una superficie plana y tersa. Suponiendo como siempre homogéneo el medio adonde va á parar el rayo, compréndese que después de su reflexión se propagará en línea recta como antes. Trátase, pues, de determinar la dirección precisa del rayo reflejado.

La primera determinación podría obtenerse por medio de la cámara oscura, aun cuando, á decir verdad, su precisión no sería mucha.

Y en efecto, hemos visto que un rayo de luz solar que penetra por el agujero de un postigo marca su dirección en el aire de la habitación iluminando los corpúsculos que siempre hay en suspensión en él. Supongamos que se coloca entonces un plano de metal bruñido ó un pedazo de cristal en el trayecto del haz incidente. Será fácil medir el ángulo que forma este haz con el plano del espejo; y como al reflejarse la luz marcará

(1) Si se hacen en el interior de una habitación oscura los dos experimentos que acabamos de describir, he aquí lo que se observará. La hoja de papel ó el objeto mate de superficie rugosa que se coloque en el trayecto del haz luminoso solar, dará una imagen del Sol que será visible desde todos los puntos de la estancia. Por el contrario, el espejo, la placa bruñida ó la superficie de azogue quedará comparativamente oscura ó invisible, y para ver la imagen del Sol, el observador deberá situarse en una dirección especial, en cuyo caso dicha imagen aparecerá proyectada ó reflejada en esta misma dirección, en una pared opuesta de la cámara oscura.

en el aire, y del propio modo que el haz incidente, su paso y su dirección, se medirá también el ángulo de inclinación que forman los rayos reflejados con el espejo.

De este modo se obtendrán fácil, pero sólo aproximadamente, las dos leyes de la reflexión especular que vamos á enunciar describiendo un medio más preciso de comprobación práctica.

Tomemos como superficie reflectora un baño de azogue y por objeto luminoso una estrella cuyos rayos pueden considerarse como rigurosamente paralelos en atención á la inmensa distancia que los separa de la superficie de la Tierra.

Examinemos uno de estos rayos SI (fig. 434), que toca en el punto I de la superfi-

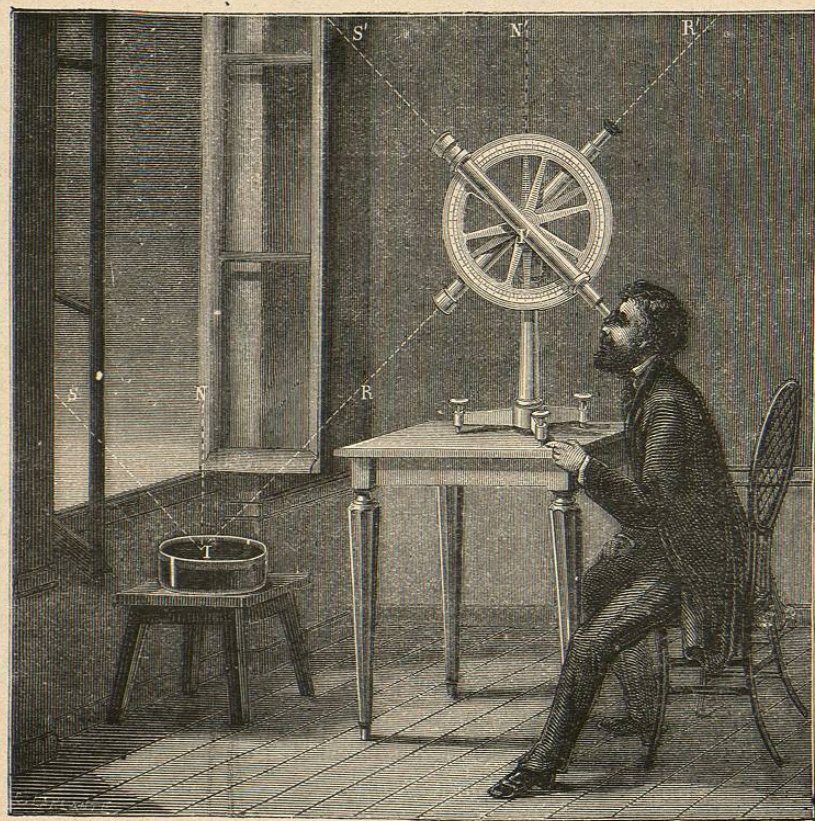


Fig. 434.—Estudio experimental de las leyes de la reflexión de la luz

cie del baño de azogue. IN es la vertical del mismo punto ó la normal á la superficie reflectora, y el ángulo SIN lo que se llama *ángulo de incidencia*. El rayo SI se refleja siguiendo la dirección IR, de modo que, colocando el ojo en esta dirección, se verá la imagen de la estrella en el baño de azogue. El ángulo que forma el rayo reflejado con la vertical IN es lo que se llama *ángulo de reflexión*, en vista de lo cual es ya fácil comprobar las dos leyes siguientes:

- 1.º *El rayo incidente, el reflejado y la vertical al punto de incidencia están en un mismo plano; luego este plano es siempre perpendicular á la superficie reflectora;*
- 2.º *El ángulo de reflexión es igual al de incidencia.*

Se puede hacer la comprobación de ambas leyes con el instrumento que indica la figura 434, el cual se compone de un círculo metálico graduado y puesto sobre un pie y de dos anteojos fijos en el centro del limbo, los cuales pueden girar en su plano; este

círculo está colocado en una posición tal que el limbo sea perfectamente vertical. Con uno de los anteojos, y haciendo girar de modo oportuno el limbo sobre su eje vertical, se enfila el baño de azogue de modo que se vea la imagen reflejada de la estrella; en este momento coincide el rayo reflejado con el eje del antejo, y el ángulo $N'I'R'$ es igual al ángulo NIR , es decir, al ángulo de reflexión. Si utilizando ahora el otro antejo lo asestamos directamente á la estrella, se demuestra que no hay que variar de posición el instrumento, ó hablando con más exactitud, que el plano del limbo, en su posición actual, contiene el rayo visual emanado de la estrella. En otros términos, el rayo incidente $S'I'$ se halla en el mismo plano vertical que el reflejado, lo que prueba la primera ley, puesto que SI es paralela á $S'I'$. Además el ángulo $S'I'N'$ es rigurosamente igual al de incidencia, toda vez que los lados de estos ángulos son paralelos, y como al contar en el limbo en grados, minutos y segundos la posición de ambos anteojos se observa que los arcos comprendidos entre la vertical $I'N'$ y sus direcciones son iguales entre sí, resulta que hay igualdad entre los ángulos de reflexión y de incidencia, con lo cual queda demostrada la segunda ley.

Sea cualquiera la posición de la estrella enfilada ó su altura sobre el horizonte, los resultados de la observación serán los mismos, y el fenómeno de reflexión obedecerá á las mismas leyes.

Así pues, si el ángulo de incidencia es nulo, ó en otros términos, si el rayo luminoso toca perpendicularmente la superficie reflectora, el de reflexión será nulo también, pues la marcha seguida á su regreso por el rayo coincide con la del rayo incidente. La luz retrocede sobre sus propios pasos en la dirección misma en que se había propagado primeramente.

III

IMÁGENES PRODUCIDAS POR LA REFLEXIÓN DE LA LUZ EN LOS ESPEJOS PLANOS

La reflexión de la luz en la superficie de los espejos da origen á la formación de imágenes, es decir, á la reproducción, con respecto á los ojos, de apariencias semejantes á los objetos, ya luminosos por sí mismos ó ya simplemente alumbrados, que están situados de modo que irradian en dicha superficie. Es un caso práctico, pero también una sencilla consecuencia de las leyes de la reflexión especular.

Al decir que las imágenes son semejantes á los objetos, suponemos que la superficie reflectora sea perfectamente plana; porque los espejos cuya superficie tiene una curvatura esférica, cilíndrica, cónica ó parabólica, alteran por lo común, ya en su forma ó ya en sus dimensiones, los objetos que se reflejan en ellos; y si la curvatura es irregular, es posible que la imagen y el objeto no tengan ya semejanza alguna. Con todo, la ley de la formación de esas imágenes es siempre consecuencia directa de las leyes de reflexión especular, y puede deducirse geoméricamente 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 también 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 aun 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 por sí misma un espejo que refleja una parte de

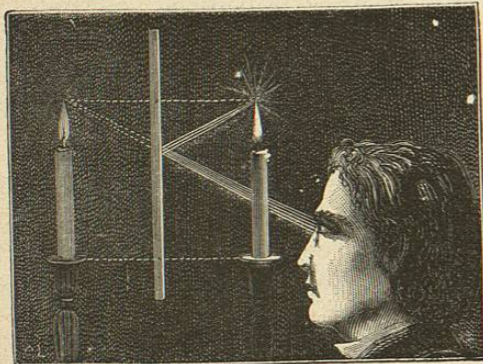


Fig. 435.—Formación de las imágenes vistas por reflexión en un espejo plano

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 también espejos naturales, y por esto un baño de azogue (lí-

quido no transparente) puede asimilarse á un espejo metálico. El agua y los demás líquidos lípidos 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 también 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 del objeto 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 (figu-

ra 435) sobre la superficie de 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. Vese 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.

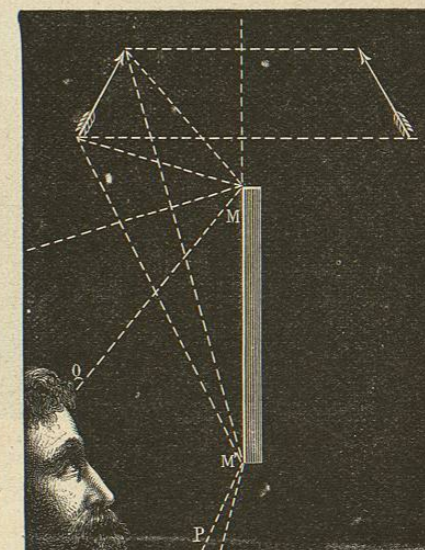


Fig. 436.—Reflexión en un espejo plano: campo del espejo para un objeto dado

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. 436) 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 substancia de que está formado el espejo. En las lunas azogadas se observa también 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 menos viva y su superficie se empaña rápidamente al contacto del aire.