

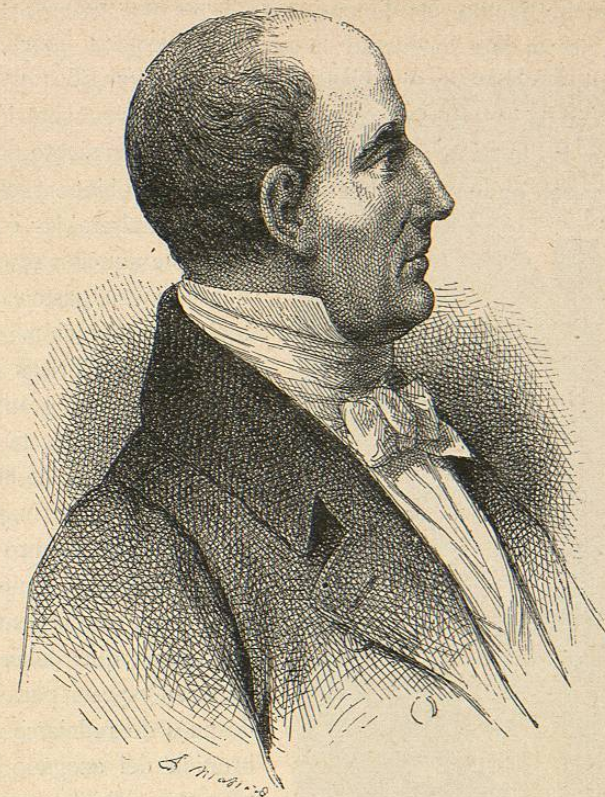
Demostremos ahora una sucinta explicación de estos singulares fenómenos. Huygens fué el primero que trató de formular la teoría del halo, suponiéndolo debido á ciertos glóbulos ó cilindros de hielo opaco rodeados de una capa de agua transparente que hubiese en suspensión en la atmósfera. Mariotte y Venturi la explicaron á mediados del siglo anterior, atribuyéndola á la refracción de la luz en los cristales de nieve ó de hielo flotantes en el aire, cristales que existen en efecto y que por lo general son de forma prismática exagonal. Bréwster, Arago, Fraunhofer y Bravais han aceptado y completado la teoría de Mariotte que basta para explicar todas las circunstancias del fenómeno.

Veamos ante todo cómo da cuenta del halo interior de 22° . La atmósfera está sembrada, entre el Sol y el ojo del observador, de una muchedumbre de agujas prismáticas, que supondremos orientadas en todas direcciones. Dos caras laterales contiguas de uno de estos prismas forman entre sí un ángulo de 120° , ángulo demasiado grande para que algún rayo de luz pueda atravesarlas sucesivamente, por cuanto el que penetrara por una de ellas y cayera en el interior sobre la segunda sufriría allí la reflexión total; pero no sucede lo propio con dos caras separadas por una tercera, porque entonces el ángulo es solamente de 60° . La luz que penetra en el prisma por una de estas caras y salga por la otra experimentará una desviación igual por lo menos á $21^\circ 50'$ (ó sea 22°), ángulo de desviación mínima para un prisma de hielo cuyo ángulo es de 60° .

De todas las agujas prismáticas orientadas de todos modos, consideremos aquellas cuyo eje es perpendicular á un plano cualquiera que pase por el Sol y por el ojo del observador: estas agujas enviarán á dicho plano luz refractada procedente de todas direcciones. Pero en una de éstas la luz será más intensa que en todas las demás; dirección que será la que corresponda á los prismas orientados de modo que den la desviación mínima, lo cual sucederá por dos razones. Primero, porque los prismas así dispuestos pueden girar ligeramente sobre su eje sin que la desviación se modifique notablemente, lo cual equivale á suponer que los prismas orientados de este modo son más numerosos que los otros. Además, durante el movimiento de rotación de los otros prismas, los rayos refractados que envían al ojo no hacen más que pasar rápidamente, mientras que los refractados en el momento de la desviación mínima son cada vez más en número sin dejar de pasar por el ojo. Todos los rayos que, después de refractarse en las agujas de hielo, lleguen á nuestra vista, pero sufriendo antes su mínima desviación, son los llamados *eficaces*, porque producen por sí solos círculos luminosos de colores que constituyen los halos. El mismo raciocinio es aplicable á todos los planos trazados por el Sol y por el ojo del observador, de suerte que todos los rayos eficaces formarán un cono, cuyo eje será la línea que reuna el ojo y el Sol. Por consiguiente, se verá un círculo luminoso alrededor del astro solar á una distancia angular igual á la que mide el ángulo de desviación mínima para prismas de 60° , y será el *halo interior*.

En cuanto á la coloración del círculo, se explica fácilmente. Como sabemos, el índice de refracción va creciendo del rojo al morado, y por tanto los rayos solares, descompuestos por la refracción prismática, no tienen el mismo ángulo de desviación mínima, sino que éste crecerá con la refrangibilidad de los rayos. Así pues, el círculo rojo estará rodeado de círculos amarillo, verde, azul, etc., cuyo conjunto constituirá el halo interior.

Por lo que respecta al exterior ó de 46° , tiene por causa la refracción de los rayos solares que atraviesan los prismas de hielo al pasar de una cara lateral á uno de los exágonos de la base. Siendo de 90° el ángulo de estas caras, la desviación mínima de los rayos medios es de $45^\circ 44'$. De aquí resulta un círculo cuyo radio á distancia angular al Sol es de unos 46° : es el *halo exterior*.



NICÉFORO NIEPCE

PARTE SEGUNDA

ÓPTICA.—APLICACIÓN DE LOS FENÓMENOS DE LA LUZ

CAPÍTULO PRIMERO

LA LUZ Y LA VIDA

I

LOS ESPEJOS

El uso de los espejos es muy antiguo. Sin necesidad de remontarnos á los tiempos de Moisés y al pasaje del *Exodo* en que se trata de los espejos de las mujeres que permanecían á la entrada del tabernáculo, sabemos que los antiguos egipcios los usaban también. En Grecia y en Roma se adornaban las paredes de las habitaciones con placas bruñidas y relucientes de acero, oro, plata, obsidiana y piedra especular; y á juzgar por lo que se desprende de varios párrafos de Plinio y Aristóteles, no fueron desconocidos de los antiguos los espejos de cristal forrado de una lámina metálica bruñida.

Hasta el siglo xv no reemplazaron á los espejos de metal bruñido las placas de cristal azogado, habiéndose fabricado los primeros en Flandes y después en Venecia, que

tanta fama alcanzó por su superioridad en esta clase de industria. En un principio, y por espacio de mucho tiempo, sus dimensiones fueron muy reducidas, pues el arte de construir grandes piezas data solamente de fines del siglo xvii, época en que se fundó la magnífica fábrica de Saint Gobain. Nadie ignora cuán difundidos están hoy, cuán general se ha hecho su uso, ya para el tocador ó ya para la ornamentación interior y aun para la exterior. Si las lunas de los espejos tienen el inconveniente de ser sumamente frágiles, también gozan de inmensa superioridad sobre los objetos metálicos, cual es la

de ser inalterables ó poco menos, al paso que aquéllos se oxidan, se empañan y exigen gastos crecidos para su mejor conservación.

Hoy las fábricas de espejos producen lunas de grandes dimensiones y de tersura perfecta que no cede en nada á la belleza de la misma substancia transparente. Cuanto más blanca, ó mejor dicho, cuanto más incolora es esta substancia, tanto más perfecta es la luna, porque entonces los rayos luminosos, que deben atravesar dos veces su espesor para llegar á la vista, después de reflejarse en la superficie bruñida del azogado, no cambian de tono y se debilitan muy poco á causa de dicho doble paso.

Digamos una palabra acerca de la superficie reflectora de las lunas ó cristales *azogados*, superficie que no es el cristal mismo, como es sabido, sino una lámina tenue de una amalgama de estaño, que se aplica á la cara posterior del cristal. He aquí cómo se efectúa esta operación. Sobre una mesa de piedra bien lisa, rodeada de pequeños



Fig. 611.—Espejo exterior ó espía

canales, se extiende la hoja de estaño, cubriéndola en seguida con un baño de azogue. Se limpia perfecta y cuidadosamente la luna y se la desliza sobre la capa de mercurio, de modo que se aparte á uno y otro lado el excedente del metal líquido; en seguida, poniendo algún peso sobre aquélla, se consigue la adherencia de las dos láminas metálicas amalgamadas á la cara del cristal que pesa sobre ellas.

Esta operación en que entra el azogue es perniciosa para la salud de los obreros que á ella se dedican, por lo cual se ha tratado de sustituir el azogado por el plateado, extendiendo al efecto sobre la superficie del cristal un compuesto de nitrato de plata, amoníaco y ácido tártrico. La plata tiene, como la amalgama de estaño, una gran potencia reflectora, pero el color de las imágenes resulta ligeramente amarillento.

En Bélgica, en otros países del Norte y aun en Francia hoy día se suelen colocar fuera de las ventanas de las habitaciones espejos que, pudiendo girar sobre su eje ó sobre unos goznes, se les da la posición que se desee, de modo que reflejen hacia el in-

terior de la habitación la imagen de lo que pasa por la calle. Estos espejos, de que se valen también los almacenistas y tenderos para vigilar desde detrás del mostrador los aparadores exteriores de sus establecimientos, se conocen con el nombre de *espías* (fig. 611).

También se hace uso de grandes espejos azogados ó metálicos para hacer que penetre la luz del cielo en el interior de una habitación oscura: por lo general, se ven estos reflectores en las calles angostas y sombrías de las grandes ciudades (fig. 612).

Cuando la luz se refleja en una superficie bruñida, pero transparente, reproducen también las imágenes, pero muy débiles, porque una gran parte de la luz incidente atraviesa la substancia. He aquí la razón de que los espejos ordinarios estén azogados por su cara posterior, resultando entonces las imágenes como sobre un cuerpo opaco sumamente bruñido. Pero también se puede hacer uso de las lunas sin azogar, que aun en este caso reflejan imágenes muy brillantes y de vivos colores, cuando los objetos que tienen delante están fuertemente iluminados y al propio tiempo el espacio que las rodea, sumido en una obscuridad relativa, recibe poca ó ninguna luz difusa. Tal es el principio

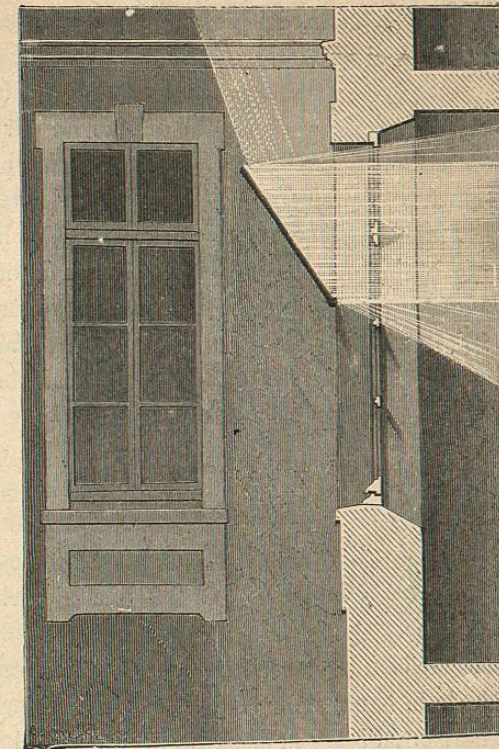


Fig. 612.—Reflector

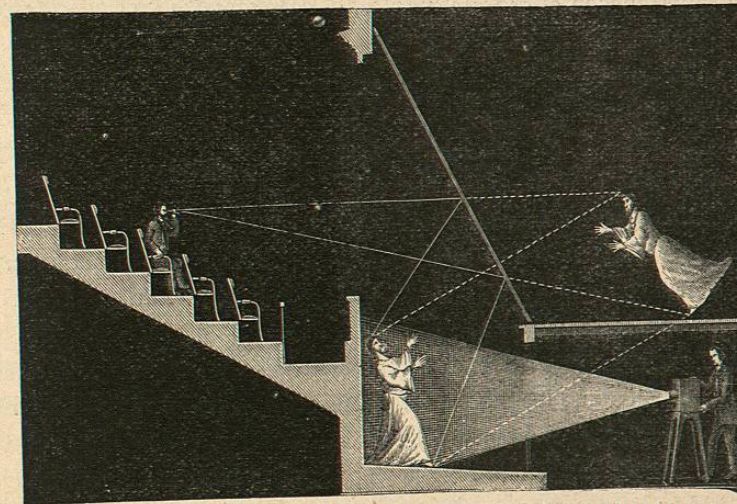


Fig. 613.—Colocación de la luna sin azogar y posición del fantasma

de las apariciones fantásticas que se presentan en los teatros con el nombre de espectros, y á las que se apela con muy buen éxito en los dramas terroríficos.

Para ello se deja casi á oscuras la platea, y entre ésta y el escenario se pone un

gran cristal. Dando á éste una posición inclinada (fig. 613), refleja la imagen de una persona, fuertemente iluminada por una luz que se dirige de lleno sobre ella desde el foso. El actor, á quien el espectador ve directamente en el escenario, y la imagen virtual, pero animada, del personaje que se halla en el foso, pueden mezclarse, confundirse, hasta el punto de producir en los espectadores la ilusión de que en realidad ha

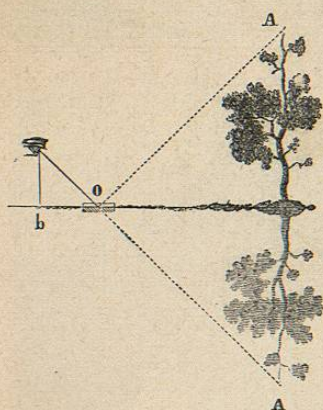


Fig. 614.—Medición de la altura vertical de un objeto

aparecido un fantasma inmaterial é impalpable. La necesidad de dar cierta inclinación al cristal hace que el fantasma no parezca perfectamente en equilibrio, defecto que notan más especialmente los espectadores situados á los lados.

Antes de describir los instrumentos científicos basados en el fenómeno de la reflexión en la superficie de los espejos planos, mencionemos una aplicación interesante y fácil de las leyes de la reflexión, la cual tiene por objeto medir las alturas verticales de los objetos, como árboles, casas, torres, etc. Colócase en el suelo y en posición perfectamente horizontal un espejito plano entre el objeto cuya altura se ha de medir y el ojo. En seguida se aleja el observador siguiendo la línea que reúne el pie del objeto con el espejo hasta que ve en él la imagen A' de la cúspide A (fig. 614). En este momento fácilmente se comprende que la relación entre la altura de la vista sobre el plano

b y la de la altura de la cima A del árbol es precisamente la que media entre la distancia horizontal bo y la distancia horizontal del pie del árbol en O. Una charca de agua no agitada por el viento produciría el mismo efecto, con una seguridad más, la perfecta horizontalidad de la superficie reflectora.

En la primera parte de la Luz hemos descrito varias aplicaciones ingeniosas, recreativas ó útiles de la reflexión en los espejos planos, combinados entre sí de muchos modos: á ellos pertenecen el *anteojo mágico*, el *polemoscopio* y el *kaleidoscopio*.

II

LOS ESPEJOS MÁGICOS

En estos últimos tiempos se ha hablado con frecuencia de cierta clase de espejos á los cuales se ha dado el nombre de *espejos mágicos*, porque presentan un fenómeno particular y maravilloso á primera vista. Véase cómo los describe M. Bertin en una conferencia que dió acerca de ellos en la Sorbona:

“Los pueblos del extremo Oriente, como los chinos y japoneses, no conocieron en lo antiguo más espejos que los metálicos, y aun hoy día no fabrican otros. Este objeto de tocador es allí de bronce, de forma y tamaño variados, pero siempre portátil. Tiene una de sus caras bruñida y por lo regular convexa, de suerte que las imágenes aparecen más pequeñas: la otra cara es plana y ligeramente cóncava, y va siempre adornada de figuritas de relieve de un trabajo más ó menos perfecto y hechas ya al fundir el metal (fig. 615). Un corto número de estos espejos resultan al ser fabricados con una propiedad maravillosa, á saber: cuando da un rayo de sol en la superficie bruñida y se refleja en una pantalla blanca, transmite á esta pantalla la imagen de los adornos que

hay en la cara posterior. En el Japón, de donde se reciben ahora estos espejos, ni el fabricante que los hace ni el comerciante que los vende conocen sus propiedades; pero los chinos son sabedores de ellas hace ya mucho tiempo y las aprecian, por lo cual les dan un nombre que significa “espejos que se dejan atravesar por la luz,” (*theu-kuang-kien*). Nosotros los llamamos *espejos mágicos*.

Arago presentó en 1844 á la Academia de Ciencias uno de estos espejos, de los que Bréwster había propuesto doce años antes una teoría, pero sin haber tenido el objeto en su poder y por consiguiente sin haber podido hacer ningún experimento. El ilustre físico francés dió en 1847 la verdadera explicación del fenómeno. Vamos á resumirla brevemente, indicando ante todo la manera cómo se hace el experimento.

Se puede utilizar simplemente la luz solar, exponer á los rayos del Sol la superficie bruñida del espejo, y recibir el haz reflejado en una pantalla blanca situada á cosa de un metro de distancia. El efecto es más intenso si se ilumina el espejo con luz divergente; el haz se dilata, puesto que la superficie del espejo es ligeramente convexa; se le puede recibir en una pantalla á mayor distancia: entonces la imagen del espejo aparece estampada en ella, y se ven con asombro los detalles de los adornos de relieve de la cara posterior del espejo, ó sea de la que no está iluminada, pareciendo estos detalles más luminosos que el fondo del espejo.

Un antiguo autor chino (del siglo XII) había dado la siguiente explicación del fenómeno: suponía que los relieves del reverso del espejo se habían reproducido en hueco en el anverso en el momento de fundirlo; que en estos huecos se había introducido un bronce más fino que el del espejo, y que se había bruñido en seguida la superficie, suponiendo debido el fenómeno á la desigualdad del poder reflector de los dos bronce. Bréwster propuso sobre poco más ó menos esta misma explicación, pero posteriormente se ha reconocido que era inadmisibile, por cuanto la superficie del espejo está amalgamada.

He aquí la verdadera teoría de los espejos mágicos.

Person observó que la superficie bruñida del espejo no era regularmente convexa, y que sólo las partes correspondientes á los huecos del reverso del espejo tenían esta regularidad. Las partes de dicha superficie que corresponden á los relieves, es decir, á los contornos de los dibujos de la cara posterior eran planas. Resulta de aquí que los rayos luminosos que dan en las partes convexas van divergiendo á formar una imagen, aunque tenue y relativamente oscura, del espejo. Los rayos del haz que se reflejan en las partes planas salen de ellas paralelamente y las imágenes que forman en la pantalla son más luminosas que las del fondo del espejo. Así se comprende que los dibujos se vean blancos en la pantalla.

La irregularidad de forma de que se trata procede del modo de fabricación y del bruñido de los espejos. Según M. Ayrton, ilustrado profesor de la Escuela de ingenieros de Yeddo, he aquí lo que practican los fabricantes de espejos japoneses:

“Al salir el espejo de la fundición en forma de disco plano, y antes de bruñirlo, se le raya desde luego en todas direcciones con un punzón, presentando como es natural



Fig. 615.—Espejo mágico japonés

más resistencia en las partes gruesas que en las delgadas. Esta operación le hace ante todo ligeramente cóncavo, y se torna convexo á causa de la reacción elástica del metal, siendo esta convexidad más perceptible en las partes delgadas que en las que corresponden á los relieves del dibujo.”

Los experimentos recientes hechos por Govi en Italia y por Bertin y Duboscq en

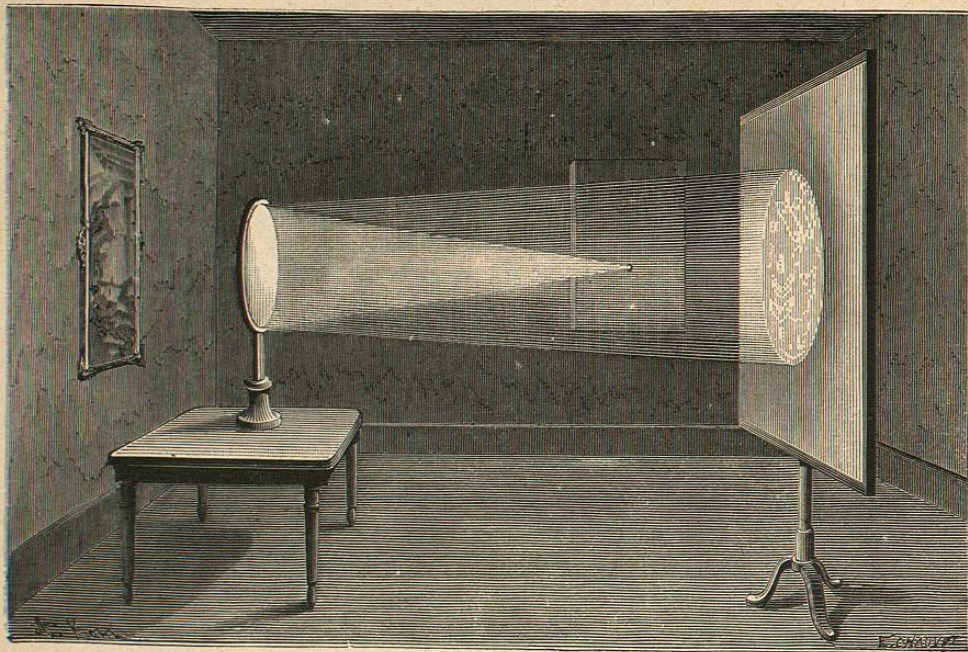


Fig. 616.—Experimento hecho con un espejo mágico

Francia han confirmado plenamente la explicación dada por Person en 1847, y demostrado además que se puede aumentar la desigualdad de curvatura que engendra el fenómeno, sometiendo la cara posterior del espejo á una temperatura elevada, ó lo que da el mismo resultado, á una fuerte presión. Cuando se calienta el espejo por detrás, las partes delgadas se caldean con más rapidez que las gruesas; la presión produce el mismo efecto, y en ambos casos son más marcadas las desigualdades de la superficie reflectora del espejo, siéndolo también el efecto mágico.

III

EL SEXTANTE

Dábase en otro tiempo el nombre de *octante* ó *cuadrante de reflexión* al instrumento que vamos á describir y del que se sirven los marinos para tomar las alturas de los astros ó las distancias angulares de la Luna y de las estrellas entre sí.

Inventólo Hadley en 1731, pero muchos sabios, entre ellos Newton, Hooke, Tomás Godfrey de Filadelfia y Harris, concibieron la idea de construir un instrumento semejante, basado en el mismo principio. Sin embargo, Hadley fué el primero que lo fabricó y que demostró su gran utilidad.

El sextante es una aplicación de un principio muy sencillo de geometría y de física,

que es á su vez una consecuencia inmediata de las leyes de la reflexión de los rayos luminosos (1).

Quando un rayo de luz ha pasado, antes de llegar á la vista, por dos reflexiones sucesivas en dos espejos planos, el ángulo de desviación de este rayo es rigurosamente doble que el ángulo de los dos espejos.

Sea SI un rayo luminoso emanado de un foco, por ejemplo de una estrella; cae en I sobre el espejo M, refléjase allí, sigue la dirección IP, y va á parar á otro espejo N, donde se refleja de nuevo, y siguiendo la dirección Po, llega entonces á la vista.

El ángulo IOP es doble que el ángulo α que forman entre sí los dos espejos.

He aquí ahora la descripción del sextante tal como se emplea hoy.

Se compone de un sector circular cuyo arco está dividido con cuidado en unos 60 grados, de lo cual procede su nombre de *sextante*, pues en otro tiempo sólo tenía 45 grados, ó sea la octava parte de la circunferencia, y de aquí su nombre primitivo *octante*: el que representa la figura 618 tiene 85 grados. El arco, que es una placa de metal bastante gruesa, está sólidamente unido al centro del sector, sobre el cual puede girar una plataforma provista de una alidada móvil, la cual lleva un nonio V que permite leer las fracciones de grado en el limbo: l es un pequeño anteojito de aumento que sirve



Fig. 617.—Principio teórico del sextante

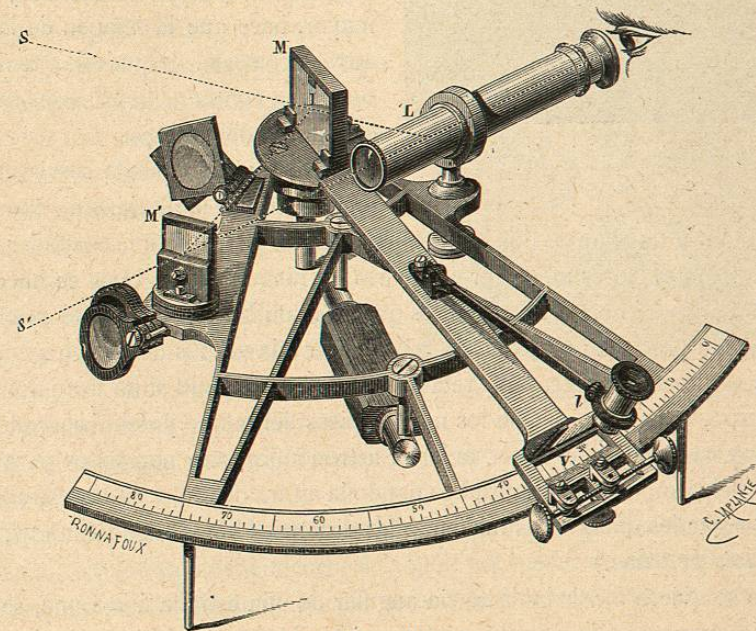


Fig. 618.—Sextante

para este último uso. En el centro del sector y en la prolongación de la línea del cero de la alidada móvil hay un espejo azogado M colocado perpendicularmente, y por

(1) Ya hemos tenido ocasión de valernos de este principio al exponer el procedimiento ideado por León Foucault para medir la velocidad de la luz.