

lo tanto se mueve á la par de la alidada. En uno de los lados del sector y en dirección exactamente paralela al rayo que va á parar al cero de las divisiones del arco hay otro espejo fijo M', el cual sólo está azogado en la mitad inferior, siendo transparente en la otra mitad.

Merced á un anteojo L fijado en el radio opuesto del sector se puede ver por transparencia en su foco un punto situado en dirección LS', y por reflexión otro punto luminoso doblemente reflejado en I sobre el primer espejo, y en I' sobre el segundo. Cuando estas dos imágenes coinciden, claro está que el ángulo de los rayos luminosos SI, S'I' es doble que el ángulo de los dos espejos, en virtud del principio anteriormente



Fig. 619.—Oficial de marina observando con el sextante

expuesto. Luego el ángulo de aquéllos es entonces precisamente igual al que forma la alidada movable con el cero del sextante. Ahora se comprenderá fácilmente cómo se hace uso del instrumento. El observador lo coge por un mango con la mano derecha, y aplicando en seguida el ojo al ocular del anteojo, lo asesta á uno de los objetos, por ejemplo á una estrella, al través de la parte no azogada del espejito. En seguida hace girar el sextante alrededor de la línea de mira hasta que la otra estrella esté en el plano del sector. Entonces, dando vuelta á la alidada y al espejo mayor, hace que la imagen de la segunda estrella coincida, después de dos reflexiones sucesivas, con la de la primera, en el centro del campo del anteojo.

“No tan sólo puede servir el sextante para observar la altura, sino también para medir la distancia angular de dos objetos situados en una posición cualquiera relativamente al horizonte. No es menester instalarlo de ningún modo, pues se hacen las observaciones teniéndolo en la mano; así es que se le utiliza especialmente en el mar, por cuanto posee la preciosa propiedad de representar á la vez los dos objetos cuya distancia angular se desea conocer, y de reunirlos uno á otro como si no formaran más que un solo cuerpo, y esto á pesar de los movimientos del buque y del observador. Con él se hacen hoy casi todas las observaciones astronómicas tan necesarias para los marinos, ya las del tiempo y de la latitud tomando la altura del Sol y de las estrellas, ó bien las de las longitudes geográficas midiendo las distancias lunares..” (Brünnow, *Tratado de astronomía práctica*.)

Cuando se quiere medir la distancia angular de una estrella á la Luna, se asesta el sextante directamente á la estrella, y en seguida se hace que la imagen del borde del disco luminoso llegue á ponerse en contacto con la de la estrella. Si se trata de la distancia del Sol á la Luna, se pone la imagen del primero en contacto con la de la segunda; pero entonces hay que colocar vidrios de colores delante de cada espejo para atenuar la intensidad de los rayos del Sol, estando estos vidrios sustentados por ejes paralelos al plano del sextante, y formando grupos de tres ó cuatro cuyo color se consigue oscurecer más y más de este modo.

expuesto. Luego el ángulo de aquéllos es entonces precisamente igual al que forma la alidada movable con el cero del sextante.

Ahora se comprenderá fácilmente cómo se hace uso del instrumento.

El observador lo coge por un mango con la mano derecha, y aplicando en seguida el ojo al ocular del anteojo, lo asesta á uno de los objetos, por ejemplo á una estrella, al través de la parte no azogada del espejito. En seguida hace girar el sextante alrededor de la línea de mira hasta que la otra estrella esté en el plano del sector. Entonces, dando vuelta á la alidada y al espejo mayor, hace que la imagen de la segunda estrella coincida, después de dos reflexiones sucesivas, con la de la primera, en el centro del campo del anteojo.

“No tan sólo puede servir el sextante para observar la altura, sino también para

Por último, si la distancia angular que se quiere medir es la de un astro sobre el horizonte, ó sea lo que se llama su altura, se tiene el sextante verticalmente, de modo que el astro esté en su plano, y se mira directamente con el anteojo el horizonte formado por la superficie misma del mar. Si falta este horizonte, se apela á uno artificial, bien sea un baño de azogue, ó bien una luna de cristal lisa puesta horizontalmente por medio de tres tornillos de nivel.

IV

LOS GONIÓMETROS

Hay en la Naturaleza un gran número de cuerpos de forma geométrica determinada, y con frecuencia terminados en caras planas y lisas, reunidas de diversos modos. Estos cuerpos son los cristales. Los mineralogistas, que encuentran los cristales ya formados en las rocas, y los químicos, que los obtienen por varios procedimientos, necesitan para definirlos conocer con precisión los ángulos de las caras de un mismo cristal, lo cual consiguen valiéndose de unos instrumentos llamados *goniómetros* (del griego *gonia*, ángulo, y *metron*, medida), basados en el mismo principio, el de las leyes de la reflexión de los rayos luminosos. Y en efecto, las caras de los cristales suelen tener un poder reflector bastante grande para que se pueda considerar y emplear cada una de ellas como un espejo plano.

Los goniómetros de reflexión son bastante numerosos. Nos limitaremos á describir dos de los más usados, el de Wollaston y el de Babinet, inventados respectivamente por estos dos célebres físicos.

El goniómetro de Wollaston se compone de las piezas siguientes:

1.º D es un limbo vertical dividido en grados en su canto y movable sobre un eje horizontal que se puede hacer girar como se quiera por medio de una virola. Un nonio V sujeto á la columna que sostiene el instrumento sirve para indicar el ángulo que se ha hecho girar al limbo.

2.º El eje del limbo está hueco y atravesado por una varilla que puede girar sobre sí misma, con entera independencia de aquél, por medio de otra virola A. Esta varilla sostiene una pieza articulada, la cual lleva á su vez una placa metálica, capaz de girar en diferentes sentidos por medio de un botón y ciertas articulaciones. En esta placa se coloca el cristal alguno de cuyos ángulos se desea medir.

Veamos cómo se efectúa esta operación.

Se escogen dos puntos de mira horizontales paralelos, por ejemplo la arista de un tejado y el barroto de la vidriera de un cuarto bajo, ó también la arista superior de una ventana abierta cuya línea oscura se destaque sobre el azul del cielo y el borde de una mesa ó el de una hoja de papel puesta sobre ella.

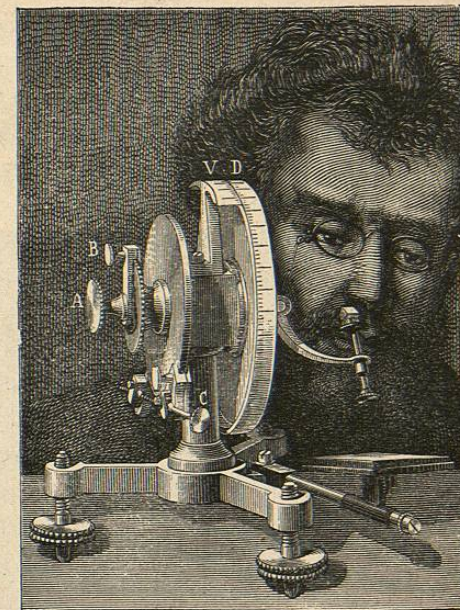


Fig. 620.—Goniómetro de reflexión de Wollaston

Hecho esto, se coloca el goniómetro en una posición tal que el limbo esté bien vertical (resultado que se obtiene con un nivel de aire y los tornillos de nivel del pie del aparato) y al propio tiempo en dirección perpendicular á las miras elegidas. Entonces se pone el cristal sobre la placa del instrumento sujetándolo con cera; siendo preciso colocarlo de modo que la arista del ángulo que se ha de medir sea á su vez perpendicular al limbo ó paralela al eje de rotación. Para ello se utilizan las imágenes de las dos miras obtenidas por reflexión en las dos caras, imágenes que para cada una de éstas deben ser bien paralelas entre sí.

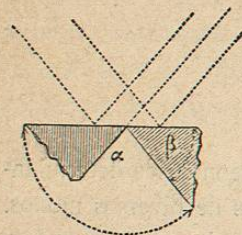


Fig. 621.—Principio geométrico del goniómetro. Angulo de rotación del cristal

Tomadas estas disposiciones preliminares, se hace que coincida el cero del limbo con el cero del nonio. Dando entonces vuelta al cristal con la virola A, se pone la imagen de la mira superior en coincidencia con la mira inferior vista directamente, ó mejor aún con la imagen de la primera mira reflejada en un espejito que se ve á la derecha fijado al pie del instrumento. Luego con un botón estriado G se hace girar el limbo y por consiguiente el cristal hasta que se obtiene la misma coincidencia, pero esta vez en la segunda cara del cristal, el cual ha ocupado las dos posiciones que indica la figura 621, habiendo girado cada cara el ángulo α .

La lectura del ángulo de rotación del limbo da en grados y en fracciones de grado, no el ángulo β del cristal mismo, sino su suplemento geométrico α , del cual se deduce el primero mediante un sencillo cálculo.

El *goniómetro de Babinet* consiste en un limbo graduado horizontal, que lleva un *colimador* fijo á un radio del círculo, ó sea un anteojo con dos hilos cruzados en su eje óptico. Tiene además otro anteojo que por medio de una alidada provista de un nonio puede girar alrededor del centro, ó estar fijo en una posición cualquiera con un tornillo de presión. Por último, en el centro del limbo hay una plataforma que puede girar alrededor de su eje vertical por medio de una alidada, la cual está provista de un nonio que sirve para medir el ángulo de rotación. Sobre esta plataforma (que no es otra cosa sino una luna de cristal plana y tersa) se coloca el cristal, cuidando de poner la arista del ángulo que se ha de medir en el centro, dándole una posición perfectamente vertical. Para cerciorarse de este último requisito, se verifica en muchas direcciones la perfecta coincidencia de las dos líneas rectas que forman la arista del cristal y su imagen en la luna.

Veamos ahora cómo se mide el ángulo.

Ante todo se pone el anteojo movable en una posición que forme un ángulo cualquiera con el del colimador; se lleva el cero del nonio de la alidada enfrente del limbo y se da vuelta al soporte del cristal hasta que se vea en el anteojo que el hilo micro-métrico colocado en su foco coincide con la imagen del hilo del colimador vista por reflexión en una de las caras del cristal.

En este momento se da vuelta de nuevo al cristal, pero esta vez con el auxilio de

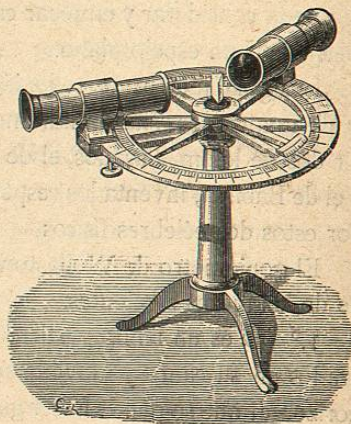


Fig. 622.—Goniómetro de reflexión de Babinet

la alidada misma, hasta que resulta la misma coincidencia con la imagen reflejada vista en la otra cara del cristal.

El ángulo de reflexión, medido con el nonio de la alidada, es el de las dos perpendiculares á las caras reflectoras; de suerte que calculando el suplemento de este ángulo se tendrá el de las dos caras del cristal.

La figura 622 representa un goniómetro de Babinet montado sobre un trípode; pero se fabrican otros más pequeños y sencillos que se pueden sostener con un mango.

Se puede utilizar el mismo instrumento en las investigaciones de óptica siempre que se emplean prismas cuyo ángulo se ha de conocer con exactitud, por ejemplo cuando se quiere determinar el índice de refracción de la substancia de que está formado el prisma.

V

LOS HELIOSTATOS

En un gran número de experimentos de óptica es necesario proyectar en dirección constante un haz de luz solar, lo cual no permite obtener directamente el movimiento diurno del Sol en los experimentos de alguna duración. Si el haz se recibe primeramente sobre un espejo plano desde el cual va á parar por reflexión al punto ó al objeto que se trata de iluminar, es preciso cambiar progresivamente la inclinación del espejo para conservar al haz reflejado su dirección constante.

Consíguese esto con los *portaluces*, aparatos que tendremos ocasión de describir más adelante, cuando tratemos del *microscopio solar*, y que consisten en un espejo susceptible de girar alrededor de dos ejes, uno horizontal y otro vertical, si el haz reflejado debe tener una dirección horizontal. Pero siempre es menester que intervenga el observador para modificar, en el sentido conveniente, la orientación del espejo.

Los *heliostatos* son aparatos destinados á evitar esta intervención; un aparato de relojería pone en movimiento constante el espejo, que es su pieza reflectora, y un mecanismo apropiado lo mantiene siempre en tal inclinación, que los rayos solares reflejados en su superficie siguen una dirección constante, á pesar del movimiento diurno del astro.

Hay heliostatos de varias clases; aquí nos limitaremos á describir los que llevan los nombres de sus inventores Gambey, Silbermann y Foucault. Pero antes daremos á conocer el principio común á todos y sin el cual no se podría comprender su disposición ni el juego de su mecanismo.

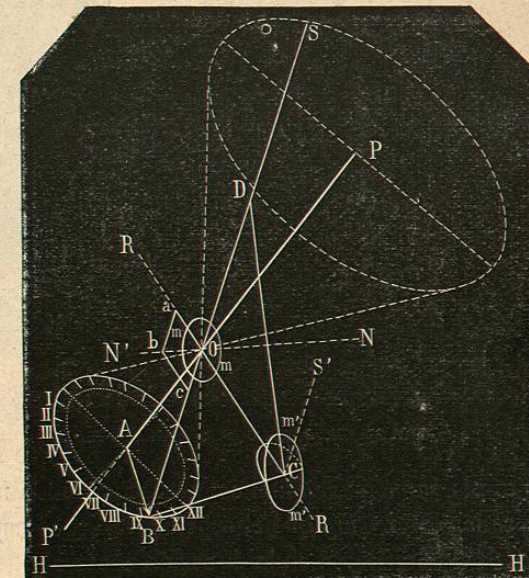


Fig. 623.—Principio geométrico de los sistemas de heliostatos

Suponiendo que la línea PP' (fig. 623) representa el eje del mundo, línea de dirección invariable en torno de la cual tiene efecto el movimiento diurno del Sol y de las estrellas, el círculo S será el curso aparente seguido por dicho astro en un día, y el ángulo SOP la declinación del Sol en la época que se considera. En A hay un cuadrante ecuatorial, en el cual marca á cada instante la sombra de la varilla ó estilo AO la hora del día. La línea SOB indicará, pues, el camino seguido por un haz de rayos solares, y si se concibe que la OB gire alrededor del punto O siguiendo constantemente el extremo B del radio AB , esta será durante todo el día la marcha de la luz incidente.

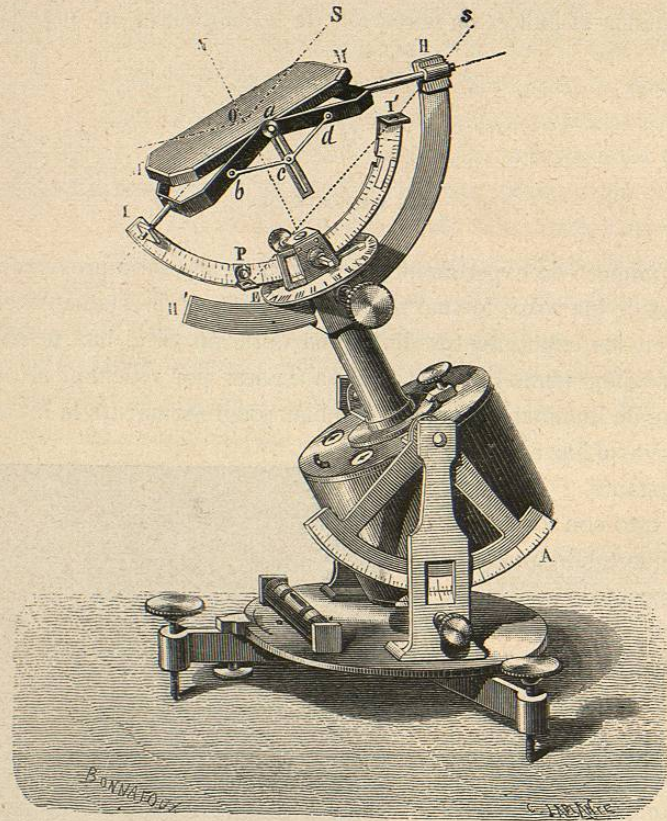


Fig. 624.—Heliostato de Silbermann

Sea RR' la dirección en la cual se desea que se reflejen constantemente los rayos solares; la bisectriz NN' del ángulo SOR será la normal al punto de incidencia, lo cual determina la posición que el espejo mm debe ocupar en el momento supuesto para que se efectúe la reflexión en la dirección apetecida.

Así pues, toda la cuestión consiste en mantener el espejo reflector en una posición relativa que sea siempre la misma con relación á la dirección constante de los rayos reflejados y á la dirección variable de los rayos solares incidentes. Esto se consigue de varios modos.

1.º Se pone encima del cuadrante ecuatorial un mecanismo de relojería que hace mover una aguja BA y describir una circunferencia entera en veinticuatro horas, por lo cual se encuentra siempre esta aguja en la dirección que ocuparía precisamente la sombra del estilo. A su extremo va unida una varilla BO á la cual se da en el cuadrante ecuatorial una inclinación igual á la declinación del Sol el día de la observación. Este

es el primer requisito que reúnen por igual los diferentes sistemas de heliostatos que se conocen.

2.º La varilla OB lleva el espejo, está unida á un paralelogramo articulado $Oabc$, cuya diagonal Ob coincide con la bisectriz del ángulo SOR , es decir con la normal al punto de incidencia, estando dirigido el lado fijo Oa del paralelogramo en la dirección OR que se quiere dar al haz reflejado. Tal es el sistema de heliostato ideado por J. T. Silbermann, y representado en la figura 624.

3.º Sea OC (fig. 623) una varilla de longitud constante que puede tomar alrededor del punto O una posición cualquiera, la que se desea dar al rayo reflejado. Esta varilla

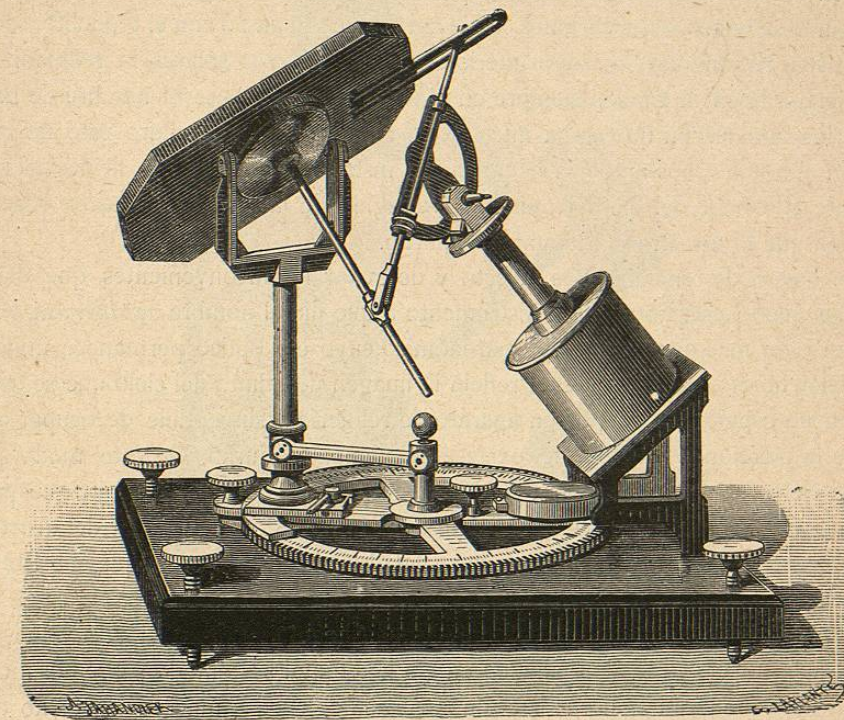


Fig. 625.—Heliostato de León Foucault

está hueca y lleva una horquilla á la cual está fijo el espejo $m'm'$, que también puede girar alrededor de OR y de AC . Otra varilla CD , situada en el plano del espejo, se articula con un anillo en D' , en el extremo de una varilla OD' igual á OC . Un rayo $S'C$ que caiga sobre el espejo paralelamente á SO se reflejará siguiendo la dirección CR . Tal es la disposición del heliostato de Gambey.

4.º El espejo está sostenido en B por una varilla vertical á cuyo alrededor puede tomar todas las direcciones posibles, dirigido por otra varilla CB normal á su superficie y articulada en B con un anillo fijado en OB á una distancia $OC=OB$. Una tercera varilla CD' , situada en su plano, tiene una ranura por la cual puede pasar la prolongación OD' de OB . Los dos triángulos OCD y OBC' son siempre isósceles, de suerte que la perpendicular CB al espejo es paralela á ON , bisectriz del ángulo de los rayos incidentes y reflejados. Este es el principio del heliostato de León Foucault.

Sentados estos principios, ya es fácil comprender el mecanismo de los tres sistemas de heliostatos de Gambey, Silbermann y Foucault, reproducidos los dos últimos en las figuras 624 y 625.

VI

EL SIDEROSTATO

Los instrumentos usados en los observatorios para las investigaciones de astronomía física adolecen de un grave inconveniente, el cual consiste en que el observador tiene que cambiar de posición juntamente con el ocular del anteojo según el punto del cielo que estudia, y también con el movimiento diurno de rotación que arrastra consigo á este punto. De aquí resulta que ha de tomar posturas incómodas, molestas y fatigosas, y en último resultado perjudiciales para el estudio del fenómeno observado.

Cuando se hacen observaciones con el anteojo meridiano ó con el teodolito, se apela á un prisma rectangular, en cuyo interior sufren los rayos solares la reflexión total, permitiendo dirigir la imagen siempre en el mismo sentido: dase el nombre de *anteojo roto* al instrumento en que se ha introducido esta modificación. Pero esto no es una solución aplicable á los anteojos ecuatoriales, instrumentos cuyo eje se desvía uniformemente alrededor del eje del mundo y va siguiendo la marcha del astro observado á medida que lo arrastra el movimiento diurno.

Con objeto de remediar este defecto y de evitar los inconvenientes que dejamos indicados, ideó León Foucault el instrumento á que dió el nombre de *siderostato*. Este no es en rigor más que un anteojo astronómico cuyo eje óptico permanece invariable en posición horizontal, ante la cual refleja la imagen del punto del cielo que se trata de observar un espejo movido por un aparato de relojería y susceptible de ocupar á todo instante la posición variable que exige el movimiento diurno. De este modo puede pasar el cielo entero, como quiera el observador, por delante del anteojo que permanece inmóvil, y aquél conserva aplicado el ojo, sin molestarse, al ocular del instrumento. Por consiguiente el siderostato es en realidad un heliostato en el que subsiste constante y horizontal la dirección del rayo reflejado.

Examinando la figura 626 se comprenderá fácilmente su disposición.

El espejo puede girar alrededor de un eje horizontal sustentado sobre dos montantes verticales que giran á su vez sobre una corona de ruedas macizas en torno de un eje vertical. Dicho espejo está sostenido por una barra perpendicular á su superficie que penetra en un anillo sujeto por una grapa cuyo eje da la dirección de los rayos incidentes del astro observado. Esta grapa está articulada en el otro extremo con la punta de un eje cilíndrico paralelo al eje del mundo y que, merced á una serie de ruedas y engranajes, gira sobre sí mismo con movimiento uniforme y con la velocidad angular del movimiento diurno. Un círculo graduado permite fijar la dirección del eje de la grapa, de modo que el ángulo que ésta forma con el eje del mundo sea igual á la distancia polar del astro. Dado el ángulo horario de este último para el momento en que el observador debe comenzar, se dispone el instrumento de modo que los rayos del astro vayan á caer en el plano que pasa por él y por el eje del anteojo, y el movimiento le deja allí en seguida mientras dura la observación.

Conviene advertir que la longitud de la grapa es precisamente igual á la distancia que media entre su eje de articulación y el eje horizontal del espejo, de lo cual resulta que reuniendo la línea los puntos medios de ambos ejes, prolongada más allá del espejo, da la dirección de los rayos reflejados. Esta dirección es, pues, constante; por lo regular se la inclina algunos grados bajo el horizonte para poder observar en caso necesario los astros muy inmediatos á él.

Una de las grandes dificultades de la construcción del siderostato consistía en el espejo plano, cuya superficie se ha de labrar de modo que presente la mayor perfección geométrica posible. En esto consiste la diferencia esencial entre el heliostato y el siderostato. En el primero, lo principal es obtener una dirección constante para los rayos reflejados; como lo que se estudia es la luz y no el foco luminoso, importa poco que éste resulte ó no deformado. El siderostato, por el contrario, debe dar una imagen exacta, idéntica, del cielo mismo, de los astros, de su figura y de su movimiento. El difícil problema de la realización de un plano óptico ha sido resuelto por León Foucault

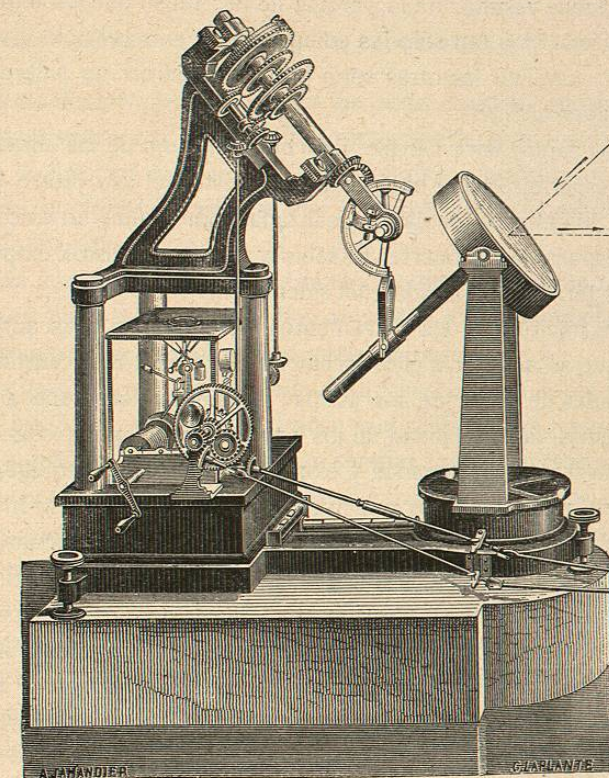


Fig. 626. — Siderostato

merced á un método cuyos elementos entregó el hábil cuanto malogrado físico á su amigo Ad. Martin.

He aquí cómo aprecia M. Wolf las ventajas del nuevo instrumento: "No hay observador, dice, que no tenga que luchar con las dificultades que ofrece el adaptar á un anteojo ecuatorial un gran espectroscopio, cámaras fotográficas, aparatos de proyección ó de estudios fotométricos. Todas estas dificultades desaparecen empleando el siderostato. Los instrumentos de los gabinetes de física, cualesquiera que sean su peso, forma y volumen, se pueden colocar delante del anteojo como delante del porta-luz de la cámara oscura, y el astrónomo estudia la luz de todos los astros en las mismas condiciones en que el físico ha estudiado la luz solar. Merced á él, se pueden realizar fácilmente muchos experimentos que parecían imposibles, y particularmente los que requieren la estabilidad perfecta del instrumento de medición: por ejemplo, las determinaciones de las posiciones absolutas de las rayas espectrales y de las dislocaciones de estas rayas, las medidas fotométricas, etc.

„El espejo del siderostato, probado en el estudio del cielo con el excelente anteojo