

## CAPITULO XVI

## FOTOMETRÍA

## I

## PRINCIPIOS DE FOTOMETRÍA

Todos sabemos, por observarlo diariamente, que la potencia luminica de una luz varía con la distancia á que se encuentra del foco el objeto iluminado. Cuando leemos de noche á la luz de una lámpara ó de una bujía, es fácil notar también que, sin alterar la distancia á que de ésta nos hallamos, podemos obtener grados variables de claridad, inclinando de cierto modo las páginas del libro; y finalmente, si en lugar de una bujía ponemos muchas á la misma distancia, ó si en vez de una lamparilla pequeña nos servimos de otra mayor cuya mecha produzca una llama más ancha, no resultará menos evidente que la claridad aumenta en cierta proporción.

Por otra parte, la potencia lumínica varía, en igualdad de circunstancias, con la naturaleza de los focos luminosos. La llama de una luz de gas nos parece mucho más deslumbradora que la de un quinqué; la luz de la Luna es muchísimo menos intensa que la del Sol, aun cuando los discos de los dos astros tengan poco más ó menos la misma magnitud aparente.

Así pues, cuando se quiere apreciar la intensidad de los focos de luz hay que distinguir ciertas circunstancias, de las cuales unas son inherentes á los focos mismos, y otras peculiares de los objetos alumbrados por ellas, como por ejemplo la distancia, la inclinación, etc. Los problemas relativos á esta clase de apreciaciones son los que constituyen la parte de la Optica llamada *Fotometría*, voz derivada de otras dos griegas que significan *luz* y *medida*.

No hay nada tan delicado ni difícil como la medición de las intensidades luminosas. A pesar de todos los progresos realizados en la óptica, todavía se carece de instrumentos á propósito para medirlas con una exactitud comparable á la de los otros elementos físicos.

El barómetro y el termómetro marcan con extraordinaria sensibilidad la presión atmosférica y la temperatura: sábase apreciar con delicadeza suma la altura relativa de dos sonidos; pero la fotometría dista mucho de haber adelantado tanto, y la comparación de las intensidades luminosas de dos luces deja aún mucho que desear. ¿De qué procede esta inferioridad? De que con respecto á este asunto no tenemos otro medio de apreciación sino el órgano con el cual percibimos la luz. La sensación de la vista es el solo juez en esta cuestión, y á pesar de su gran sensibilidad, el ojo es poco apto para decidir acerca de las relaciones numéricas de dos ó muchas luces que se hallan simultánea ó sucesivamente ante él.

Esta dificultad no es menor aun en el caso de tener que juzgar de la identidad de dos focos. Si las observaciones no son simultáneas, la comparación será tanto más difícil cuanto más tiempo transcurra entre ellas. Así pues, ante todo es preciso hacer de

modo que se observe las dos luces al mismo tiempo, cosa no siempre posible (1). Las más de las veces el brillo de los focos deslumbrá, hiere la vista, la incapacita para juzgar con alguna precisión, y por esta razón los físicos, en lugar de comparar los focos mismos entre sí, observan superficies de igual naturaleza, alumbradas por esos focos en las mismas condiciones de inclinación y de distancia. Finalmente, hay otra causa de incertidumbre de la cual no parece fácil eximirse, y es la diversidad de los colores de las luces que se ponen frente á frente. "Entre dos luces de diferentes colores, dice J. Herschel, no se puede establecer ningún paralelo susceptible de precisión; y la incertidumbre de nuestro juicio es tanto mayor cuanto más lo es esta diferencia de coloración."

A pesar de todas estas dificultades, se ha conseguido formular, ya por el raciocinio ó bien por la experiencia, unos cuantos principios que han sugerido la invención de

varios aparatos fotométricos de los cuales describiremos los más notables. Hoy que el alumbrado público ó privado ha adquirido tan considerable extensión, hoy que se siente la necesidad de auxiliar la navegación por las costas haciendo llegar á la mayor distancia posible la luz de los faros, los fotómetros son instrumentos de gran utilidad práctica; pero los primeros procedimientos ideados para comparar focos de luz debieron ser á personas entendidas que solamente tenían en consideración la parte científica del problema. Auzout y Huygens en el siglo xvii, Andrés Celsio, Bouguer y Wollaston en el siguiente, trataron de determinar el brillo relativo de las luces de los astros, por ejemplo la intensidad de la luz del Sol, comparada con la de la Luna ó con la de las estrellas más brillantes.

El primer principio que formularon fué el siguiente: Cuando varía la distancia de un punto luminoso al objeto alumbrado por él, la intensidad que emana de este punto varía *en razón inversa del cuadrado de la distancia*. Y en efecto, el punto luminoso irradia luz en todos sentidos con igual fuerza; pero estos rayos divergen más y más conforme va aumentando la distancia. Si se detienen en la superficie de una esfera de cierto radio, producirán en un elemento *m* (fig. 578) de esta esfera una iluminación de determinada intensidad; si, prosiguiendo su camino, se detienen en una esfera de do-

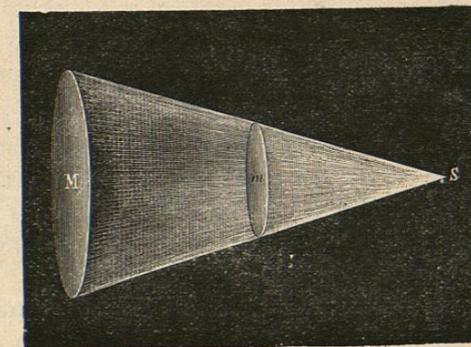


Fig. 578.—Ley del cuadrado de las distancias

(1) "Tan poco puede servir el ojo para medir la luz, dice J. Herschel en su *Tratado de la luz*, como la mano para apreciar el peso de un cuerpo cogido al azar. Y esta incertidumbre aumenta á causa de la naturaleza misma del órgano que se halla en un estado de fluctuación continua motivada por la abertura mayor ó menor de la pupila que se contrae ó dilata por la excitación de la luz misma, y causada también por la sensibilidad variable de los nervios ópticos. Compárese el brillo deslumbrador de un relámpago en una noche oscura con la sensación producida en pleno día por el mismo fenómeno; en el primer caso, el ojo sufre una impresión desagradable, y la agitación violenta que experimentan los nervios ópticos de la retina subsiste algún rato después, haciéndonos ver una sucesión rápida y alternativa de luz y oscuridad. De día no produce este efecto un relámpago, y podemos observar los trazos sinuosos del rayo con mayor facilidad, y sin que nos moleste ese resplandor prodigioso que tan vivamente hace resaltar la oscuridad que precede y sigue al rayo."

ble radio, los mismos rayos que se difundían por la superficie  $m$  se difundirán por la  $M$  de la nueva esfera. Ahora bien; la geometría nos enseña que  $M$  es cuatro veces tan extensa como  $m$ , y siendo la misma la cantidad de luz que se difunde por una superficie cuatro veces mayor, síguese de aquí que su intensidad será igual número de veces menor. A triple distancia, ésta será nueve veces menor. Por lo general, disminuye á la par que aumenta el cuadrado de la distancia.

Por lo demás, esta ley sólo es verdadera en cuanto se hace abstracción de la absorción de los rayos luminosos por los medios en que se mueven. Pero también es aplicable en el caso de que el foco de luz no sea ya un simple punto luminoso y presente una superficie aparente apreciable, con tal que esté á bastante distancia del objeto alumbrado para que se le pueda considerar situado á distancia igual de todos los puntos del foco.

De este primer principio de fotometría resulta que si se pone ante la luz de una vela un pedazo de papel blanco, por ejemplo, y se le va retirando á distancias dos, tres ó cuatro veces mayores, el resplandor del papel será cuatro, nueve ó diez y seis veces menor; mas para esto es menester que el papel esté siempre colocado perpendicularmente á la dirección de los rayos luminosos. Si se inclina el papel en esta dirección sin variar la distancia, es evidente que el resplandor disminuirá, puesto que la misma superficie interceptará un número menor de rayos. La cantidad de luz recibida varía entonces con arreglo á una ley llamada *ley de los cosenos*, porque es proporcional á los cosenos de los ángulos que la dirección de los rayos luminosos forma con la perpendicular á la superficie alumbrada.

En todo cuanto acabamos de decir sólo se trata de la potencia iluminadora del foco de luz, no de su brillo intrínseco. Si este último no varía, claro es que dicha potencia será tanto mayor cuanto mayor sea la superficie del foco, del propio modo que, en el caso de que el brillo intrínseco aumentara, la potencia iluminadora aumentaría en la misma proporción.

Una consecuencia de los principios que preceden es que cualquier foco luminoso conserva el mismo brillo intrínseco aparente cualquiera que sea la distancia á que se encuentre de nuestra vista. A decir verdad, la cantidad de luz que penetra por la abertura de nuestra pupila, disminuye en razón inversa del cuadrado de la distancia. Pero, como emana de una superficie luminosa cuyo diámetro aparente es cada vez más pequeño y que decrece en razón directa del cuadrado de esta misma distancia, hay compensación exacta, y el brillo subsiste por igual en cada uno de los puntos de la superficie. Esta es la razón de que la luz de los planetas, como Venus, Marte y Júpiter, nos parece siempre tan viva cuando los vemos á una misma altura sobre el horizonte, con tal que la pureza de la atmósfera sea también la misma, aun cuando sus distancias á la Tierra sean muy variables. El Sol se ve desde los diferentes planetas, de Mercurio á Neptuno, en forma de disco cuya superficie aparente varía de 1 á 7,000 próximamente; la cantidad de luz que recibe cada uno de estos cuerpos cambia, pues, en la misma proporción; pero el brillo intrínseco del disco es el mismo en Mercurio que en Neptuno, suponiendo que los espacios celestes no absorban la luz, y que, en su paso al través de las atmósferas de los dos planetas, experimente el mismo grado de extinción (1).

(1) Sería preferible decir que este brillo intrínseco es el mismo en el límite exterior de la atmósfera de cada planeta.

Nadie ignora que, si se mira una bala roja en la obscuridad, no se percibe su forma esférica; créese ver un disco plano cuyas partes todas presentan la misma intensidad luminosa. Si en lugar de una bala esférica es una barra de hierro ó de plata bruñida y de forma prismática calentada al rojo, ocurrirá un fenómeno análogo. Cualquiera que sea la posición de esta barra, no se ven sus aristas; el resplandor es por todas partes igual, lo mismo en las caras que se presentan perpendicularmente á la vista que en las que están más ó menos inclinadas; en una palabra, parecerá que se ve una placa enteramente plana. Si se da vuelta á la barra, no se conocerá este cambio sino por la variación aparente de la anchura de la cinta luminosa.

¿Qué debe deducirse de estos experimentos? Que la cantidad de luz emitida por un cuerpo sólido incandescente en dirección determinada depende de la inclinación de su superficie sobre la dirección de los rayos luminosos. En efecto, si dos elementos iguales, tomados, uno en el lado de la barra metálica que da frente á la vista del observador, y otro en una cara inclinada, emitieran en esta dirección la misma cantidad de luz, es evidente que la cara inclinada será la que parezca de mayor brillo, puesto que el mismo número de rayos estará distribuido en un área cuya magnitud aparente será menor. El Sol es una esfera luminosa; pero el aspecto que presenta es el de un disco plano, cuyo brillo intrínseco no es mayor en los bordes que en el centro (1), lo cual confirma la ley que acabamos de enunciar y que se llama también *ley de los cosenos*, porque la cantidad de luz emitida por elementos iguales de la superficie de un foco varía como los cosenos de los ángulos que forman los rayos con la perpendicular á la superficie.

## II

## PROCEDIMIENTOS FOTOMÉTRICOS

Tales son los principios en que se basan los físicos para valuar la potencia lumínica ó bien el brillo intrínseco de los focos de luz. Antes de describir los aparatos que sirven para medir estas intensidades y que se llaman *fotómetros*, conviene decir cuál es la *unidad luminosa* generalmente adoptada. La elección de esta unidad no es tan fácil como pudiera creerse, á lo menos si se exige que llene rigurosamente la condición esencial de *subsistir siempre idéntica á sí misma*. Como observa con razón M. Becquerel, aún no está resuelta esta cuestión de la que tanto se han ocupado los físicos. En sus experimentos fotométricos, tomaba Bouguer por unidad de poder lumínico la luz de una vela ó de una bujía; pero la intensidad de semejante luz depende de la pureza de la materia de que está formada, de sus dimensiones y de las de la mecha (2). Especificando la composición y el peso de la materia consumida, tomando por ejemplo como unidad la luz de una bujía esteárica que queme *diez gramos en una hora*, se realiza sobre poco más ó menos la condición de identidad de que más arriba hemos hablado.

Hoy se ha convenido en tomar por unidad para los experimentos fotométricos la luz de la lámpara Carcel, que quema 42 gramos de aceite de colza refinado por hora,

(1) Hoy está probado que las partes centrales del disco solar son las más luminosas, al contrario de lo que debería ser si hubiera igualdad en la emisión de la luz en toda la superficie. Los astrónomos han deducido de aquí que el astro está rodeado de una atmósfera absorbente.

(2) Según Rumford, representando por 100 la intensidad de la luz de una vela bien despabilada, queda reducida á 39 á los 11 minutos; 19 minutos después sólo llega á 23, y baja hasta 16 cuando se la deja arder 29 minutos sin despabilarla.

y cuya mecha tiene tres centímetros de diámetro. De los experimentos comparativos hechos resulta que la potencia lumínica de esta luz equivale á 8 ó 9 veces la de una bujía esteárica que queme 10 gramos.

La figura 579 representa el fotómetro de Rumford, el cual está basado en la circunstancia de que, si las sombras que produce en una misma pantalla un cuerpo opaco alumbrado por dos luces diferentes son de igual intensidad, las potencias lumínicas de estas dos luces son iguales cuando éstas se hallan situadas á la misma distancia de la pantalla, ó están en razón inversa de los cuadrados de estas distancias cuando se encuentra una luz más apartada que otra.

Supongamos que se quiera comparar las intensidades luminosas de una luz de gas y de una bujía ordinaria. Para ello se colocará verticalmente delante de una pantalla

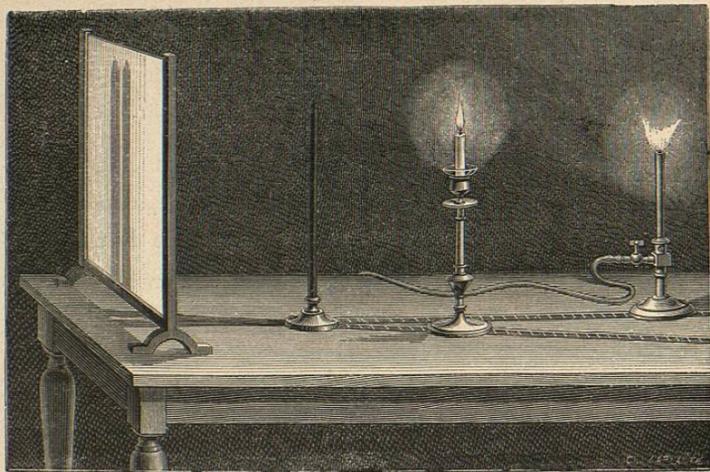


Fig. 579.—Fotómetro de Rumford

de papel blanco una varilla negra cilíndrica, y se situarán las dos luces de modo que las dos sombras de la varilla se proyecten sobre el papel casi una junto á otra. Hecho esto, se aparta poco á poco la luz que dé la sombra más intensa, hasta que no se note diferencia entre las intensidades de las sombras. Para juzgar mejor de la igualdad de éstas, se mira la pantalla por la cara opuesta á la iluminada directamente por ambas luces; en este momento, las partes luminosas de la pantalla reciben los rayos de las dos á la vez, al paso que cada sombra sólo está iluminada por una de ellas; y por consiguiente, la igualdad de sus tonos indica la de las iluminaciones de la pantalla por cada foco de por sí, estando entonces las intensidades luminosas de estos focos en razón inversa de los cuadrados de sus distancias á la pantalla.

El fotómetro de Ritchie (fig. 580) consiste en un tubo dado interiormente de negro, que lleva en su parte media dos espejos  $mm'$ , con una inclinación de  $45^\circ$ , pero en sentido contrario. La cara superior del tubo tiene, enfrente de los espejos, una abertura que se tapa con una lámina tenue diáfana  $acb$ , por ejemplo con una hoja de papel untada de aceite. Las dos luces que se han de comparar están situadas á uno y otro lado de modo que cada una de ellas envíe un haz luminoso al espejo correspondiente. La reflexión despiden verticalmente estos haces, uno sobre la mitad  $ac$  y otro sobre la  $cb$  de la lámina, y entonces se aparta la luz más viva hasta que la vista juzgue que las

dos mitades están alumbradas por igual. Tomando la razón inversa de los cuadrados de las distancias  $LO$ ,  $L'O'$ , se tiene la de las intensidades luminosas de las dos luces. A veces se sustituyen los espejos por dos cartones blancos, suprimiéndose entonces la lámina diáfana que tapa la abertura  $ab$ .

Si se hace una mancha en una hoja de papel blanco con una gota de cera ó de ácido esteárico, y se extiende la hoja sobre un marco, se tiene el sencillo fotómetro de Bunsen. Cuando se alumbrada una cara de la hoja, esta cara, vista directamente por reflexión, presenta una mancha oscura sobre fondo luminoso (fig. 581); vista por el otro lado por transmisión ó sea al trasluz (fig. 582), la presenta clara sobre fondo oscuro. Si dos luces de intensidad desigual alumbran á la vez las dos caras del cuadro, la man-

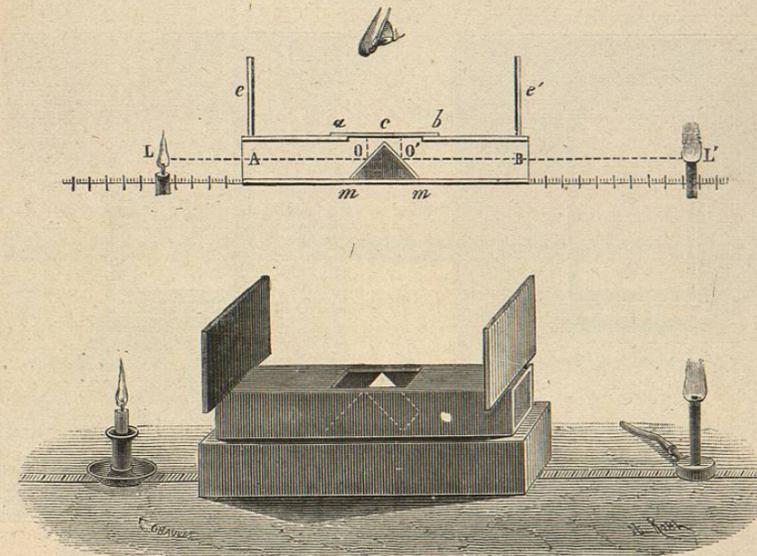


Fig. 580.—Fotómetro de Ritchie. Corte y vista exterior

cha parecerá oscura del lado del foco más luminoso, y clara del lado del más débil. Por último, si las luces son de igual intensidad ó si la más fuerte está á una distancia que compense esta desigualdad, la mancha desaparecerá, y la hoja de papel parecerá uniformemente iluminada. Con dos espejos que tengan la misma inclinación á cada lado del marco se puede juzgar simultáneamente de la desaparición de la mancha de las dos caras de la hoja.

El fotómetro de Bouguer (fig. 584) está basado en la igualdad de brillo de dos porciones de una misma superficie alumbradas separadamente por cada foco. Una pantalla opaca impide que la luz del uno llegue á la parte de superficie iluminada por el otro. Esta superficie es una hoja de papel dada de aceite ó un cristal raspado. León Foucault empleaba con preferencia una placa de porcelana muy homogénea y bastante delgada para ser diáfana. Las dos porciones alumbradas aisladamente sólo están separadas por una estrecha línea de sombra producida por la pantalla, ó (fig. 585) por una línea luminosa que marca el espacio iluminado á la vez por ambos focos. En uno y otro caso, el ojo situado detrás puede apreciar fácilmente el momento en que hay igualdad de brillo, obtenida la cual, se deducen las intensidades luminosas de sus distancias á la placa de porcelana.