

CAPITULO XII

PROPAGACIÓN DEL CALOR.—CALOR RADIANTE

I

PROPAGACIÓN DEL CALOR EN EL VACÍO: SU VELOCIDAD

Al describir los efectos del calor en los cuerpos, efectos que modifican su volumen ó cambian su estado físico, no hemos dicho nada acerca del modo cómo pasa el calor desde el foco al cuerpo caldeado. Cuando dos cuerpos están en presencia uno de otro, ya en contacto ó bien á alguna distancia, hay entre ellos cambio de calor, según lo prueba la experiencia, por poco desiguales que sean sus temperaturas, de suerte que cada uno de ellos es un foco de calor para el otro; pero las más de las veces se da el nombre de foco ó manantial de calor al cuerpo de temperatura más alta. Lo que ahora tenemos que estudiar son los varios modos de propagación del calor cuando pasa de un foco á un cuerpo más ó menos distante de él, ó se propaga por distintos medios.

La experiencia nos enseña que el calor se propaga de dos modos: véanse algunos ejemplos de cada uno de éstos, que podríamos multiplicar fácilmente, con arreglo á las observaciones que tenemos ocasión de hacer diariamente. Cuando tenemos en una mano el extremo de una barra de hierro fría y ponemos al fuego el otro extremo, transcurre cierto tiempo antes que sintamos el calor del foco, al propagarse sucesivamente á lo largo de la barra; cuanto más corta es ésta, más breve también es el espacio de tiempo, y por otra parte la intensidad del calor así propagado va creciendo á partir del momento de la primera impresión si se mantiene la barra en el foco. Aquí el calor ha caminado á lo largo del metal y de molécula en molécula; por intermedio de las partes materiales ha ido así á parar de una punta á otra de la barra de hierro hasta transmitirse á la mano por contacto. Tal es un ejemplo de propagación del calor por conductibilidad. De este mismo modo crece la temperatura de las paredes de una vasija cuando se echa en ella agua caliente.

Pero no sucede lo propio cuando el calor de un cuerpo incandescente se comunica al rostro de la persona que quita de pronto la pantalla interpuesta entre ella y el foco calorífico. Entonces la rapidez de la impresión sentida nos prueba que el calor no se ha propagado calentando poco á poco el aire interpuesto entre el fuego y el rostro, sino en virtud de un modo de movimiento análogo al de la luz emanada de un foco luminoso. En este caso se dice que el calor se propaga por *radiación*, y se da el nombre de *calor radiante* al emitido por los focos mediante este modo de transmisión á mayor ó menor distancia.

En resumen, cuando delante y á cierta distancia de un cuerpo hay un manantial de calor, puede elevar éste la temperatura de aquél de dos modos: ó calentando sucesivamente molécula por molécula todas las partes materiales interpuestas entre uno y otro, ó transmitiéndole directamente su calor, sin que la elevación de temperatura de las

partes intermedias sea condición precisa para que se eleve la del cuerpo. El calor se propaga por *conductibilidad* en el primer caso, por *radiación* en el segundo.

Como los demás modos de propagación del calor pueden referirse á uno ú otro de estos ó á su combinación, vamos á estudiar cada uno de ellos separadamente. Empecemos por el calor radiante.

La acción de los rayos solares, que se nota á 37 millones de leguas kilométricas de distancia, prueba que el calor no necesita de un medio ponderable para propagarse, y en realidad, cuando atraviesa la atmósfera, y llega á la superficie del suelo, después de cruzar los espacios interplanetarios, lo caldea directamente, sin haber elevado de un modo sensible la temperatura de las capas superiores del aire, como lo prueba el frío que reina en las altas regiones de la atmósfera y en las cumbres de las montañas.

El calor irradia de todos los cuerpos incandescentes que podemos observar en la superficie de la Tierra, del mismo modo que el calor emanado del Sol. El calor obscuro goza también de la misma propiedad, es decir, se propaga desde un punto cualquiera del foco á cualquier distancia por radiación directa, sin que el caldeo de los puntos intermedios sea una condición de la propagación. Un experimento de Rumford ha puesto este resultado fuera de duda. Este físico construyó un barómetro terminado por su parte superior en un globo en el cual penetraba la bola *a* de un termómetro y que de este modo formaba la cámara barométrica del instrumento, de suerte que su capacidad estaba enteramente vacía de materia ponderable (fig. 615). Habiendo entonces cerrado al soplete y separado el globo, metió su parte inferior en agua hirviendo, y al punto subió el termómetro, efecto que no podía atribuirse más que á la radiación en el vacío del calor comunicado por el agua á la pared interior del globo. Por otra parte, el caldeo producido por tal manera no puede atribuirse á la propagación del calor por el tubo del termómetro, pues si se repite el experimento metiendo únicamente en el agua este tubo, se ve que pasa mucho más tiempo para que suba el mercurio, y aun que éste no llega á tanta altura.

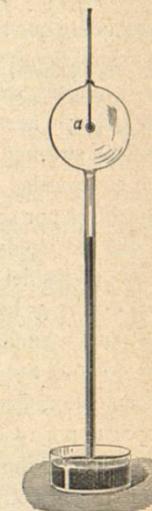


Fig. 615.—Radiación del calor obscuro en el vacío.

Newton había hecho mucho antes que Rumford un experimento muy parecido. He aquí cómo lo describe en su *Optica*: "Si, después de suspender en dos anchos y largos vasos de vidrio invertidos dos pequeños termómetros de modo que no toquen los vasos, y después de extraer el aire de uno de éstos se los transporta á ambos desde un sitio frío á otro caliente, el termómetro que estaba en el vacío se pondrá tan caliente y casi tan pronto como el del vaso lleno de aire. Si se vuelve á trasladar en seguida los dos vasos á un sitio frío, el termómetro que está en el vacío se enfriará casi al mismo tiempo que el otro."

Benedicto Prevost ha hecho varios experimentos para demostrar la radiación del calor obscuro, colocando el cuerpo caliente en el foco de un espejo cóncavo, y un termómetro en el de un espejo conjugado, el cual marcaba una elevación de temperatura que sólo podía atribuirse á la conductibilidad del aire interpuesto. Esta elevación subsistía en efecto, cuando el operador interponía entre el termómetro y el foco una pantalla de vidrio animada de un rápido movimiento de rotación, ó bien un chorro de agua fría que se renovaba de continuo.

El calor radiante, lo propio que la luz, se propaga en línea recta por los medios homogéneos; por consiguiente, si entre un manantial de calor y una de las bolas del termómetro diferencial de Leslie se interpone una serie de pantallas cada una de ellas con un agujero, el instrumento no marcará elevación alguna de temperatura sino cuando todos los agujeros estén en línea recta.

La velocidad de propagación del calor radiante parece ser del mismo género que la de la luz. Su transmisión en la superficie de la Tierra es instantánea; por lo menos jamás se ha podido comprobar ningún intervalo de tiempo apreciable entre el momento en que se retira una pantalla que intercepta un haz de rayos caloríficos y el en que empieza á producir su efecto en los termoscopios más sensibles. Verdad es que los experimentos de esta clase hechos por Pictet después, lo fueron á distancias muy cortas (100 metros, y 23 próximamente); pero más adelante veremos que hoy se admite generalmente que la radiación del calor se efectúa como la de la luz, por el intermedio de las ondulaciones del éter; que entre las ondulaciones caloríficas, lo propio que entre las luminosas, sólo hay diferencias de longitud de onda ó de velocidad del movimiento vibratorio; y además, que todas las leyes que rigen los fenómenos de la luz tienen también su comprobación ó su aplicación en las del calor radiante. Dedúcese de aquí que la velocidad de propagación de éste es la misma que la de la luz ó sea 300,000 kilómetros por segundo.

¿Es tan rápida la radiación procedente de los focos de calor obscuro como la que emana de los del luminoso? Ningún experimento permite afirmarlo ó negarlo; lo único que se sabe es que las radiaciones de un mismo foco, luminoso ú obscuro, no son simples por lo común, sino que comprenden rayos de calidades distintas; además, los focos que, como el Sol y los cuerpos incandescentes, irradian calor luminoso, emiten simultáneamente radiaciones oscuras. Es, pues, más que probable que el calor obscuro se propague por radiación con la misma velocidad que el luminoso.

Obscuro ó luminoso, el calor de cualquier foco irradia por igual en todos sentidos; su intensidad decrece, así como la de la luz, en razón inversa del cuadrado de la distancia del foco. Todo cuerpo se enfría al irradiar calor; pero la rapidez con que su temperatura baja cierto número de grados depende de la naturaleza de la substancia, del estado de su superficie, de suerte que los diferentes cuerpos tienen poderes radiantes ó *emisivos* distintos. Al dar en la superficie de un cuerpo el calor emanado de un foco por vía de radiación, sufre en ella los mismos cambios que la luz; una parte se refleja y en seguida vuelve al medio que había atravesado; otra es absorbida, dependiendo también de la naturaleza del cuerpo y del estado de su superficie la proporción mayor ó menor de ambas cantidades de calor, y constituyendo así lo que se llama *poder reflector* y *poder absorbente* del cuerpo. En todo esto suponemos que el calor irradia en el vacío, ó, si este medio es ponderable, que los rayos caloríficos lo atraviesan sin calentarlo. Melloni ha dado el nombre de *diatermanos* ó *diatérmicos* á los medios materiales, gaseosos, líquidos ó sólidos que tienen la propiedad de dar paso al calor radiante sin que se modifique sensiblemente su temperatura, del mismo modo que llamó *atermanos* ó *adiatérmicos* á los cuerpos que el calor radiante no puede atravesar. Pero ya veremos que no se pueden tomar en absoluto estas propiedades y las denominaciones que las corresponden, pues hay substancia que siendo atermana cuando tiene cierto espesor, se torna diatermana hasta cierto punto si dicho espesor es menor. Como se ve, es una nueva analogía con la luz, respecto de la cual los cuerpos son más ó menos transparentes, diáfanos ú opacos.

Al pasar los rayos de calor de un medio á otro de densidad diferente, sufren en su dirección una desviación análoga á la de los rayos de luz, se refractan, fenómeno que, según veremos, se manifiesta lo mismo con el calor obscuro que con el luminoso. Por último, el calor, así como la luz, posee la propiedad de la doble refracción y la polarización.

Vamos á ocuparnos sucesivamente de todos estos fenómenos de emisión, reflexión, absorción y refracción del calor, describiendo los principales experimentos gracias á los cuales se han conocido sus leyes.

II

INTENSIDAD DEL CALOR RADIANTE: SUS VARIACIONES

Como el calor que irradia de un foco ó manantial calorífico se propaga en línea recta y en todos sentidos, lo propio que la luz, su intensidad varía con arreglo á las mismas leyes que la luminosa; está en razón inversa del cuadrado de las distancias, y para una misma distancia es proporcional al coseno del ángulo que forma la dirección de los rayos de calor con la normal á la superficie de que emanan ó sobre la que caen.

Demuéstranse estas leyes por el raciocinio así como por la experiencia. Para el primer modo de demostración, remitimos al lector al capítulo de la *Luz* en que se ha tratado de esta misma cuestión con relación á los rayos luminosos. En cuanto á la demostración experimental, se hace con el auxilio de la pila termoeléctrica de Nobili.

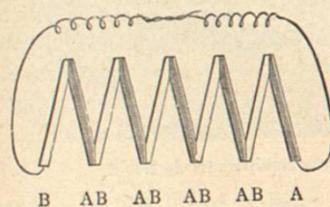


Fig. 616.—Elementos de la pila termoeléctrica de Nobili

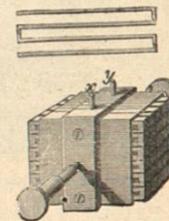


Fig. 617.—Disposición de las barras en el termomultiplicador

Pero antes de decir en qué consiste, debemos reproducir aquí la descripción de este aparato, tal como la hemos dado en el capítulo VII de la primera parte de este tomo consagrada á la *Electricidad*, advirtiendo de paso que Melloni hace constante uso del *termomultiplicador* para el estudio de las diversas propiedades del calor radiante.

La pila termoeléctrica de Nobili se compone de lo siguiente: Una serie de barras de antimonio AAA... soldadas punta con punta á unas barras de bismuto BBB... de igual longitud que aquéllas, está plegada de tal suerte (fig. 616) que todas las soldaduras pares se hallan á un mismo lado y las impares á otro. Uniendo ambas series por medio de dos alambres que parten de las barras extremas, se tiene un circuito en el cual nacerá una corriente eléctrica tan luego como haya una diferencia de temperatura entre las soldaduras opuestas. Se agrupa cierto número de elementos semejantes dando al grupo la forma de un prisma rectangular (fig. 617), cuyas dos caras opuestas contienen, la una todas las soldaduras pares de las barras y la otra todas las impares, y hacen las veces de reóforos de esta pila dos bornas fijas en dos caras laterales del

prisma, una de las cuales comunica con la primera barra de bismuto, y la otra con la última de antimonio.

Cuando se quiere hacer uso de la pila de Nobili para estudiar la radiación calorífica, se reúnen los dos polos con un galvanómetro (fig. 618), y se resguardan las caras de la pila de las variaciones irregulares de temperatura con cubiertas de latón de forma prismática, provistas de unos orificios que se abren y cierran á beneplácito. Apenas actúa un foco de calor sobre una de las caras de la pila, se engendra una corriente y se observa una desviación en la aguja del galvanómetro. La dirección de la desviación depende de cuál sea la cara calentada, y su amplitud marca la intensidad de la corriente que á su vez puede servir para determinar la diferencia de temperatura de las caras

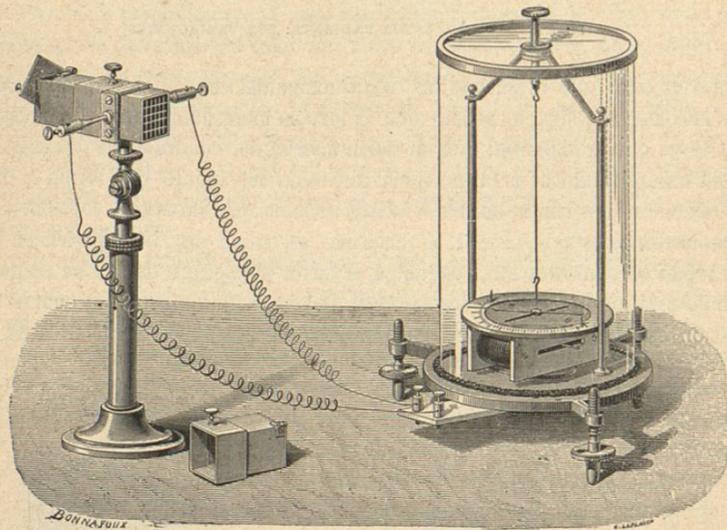


Fig. 618.—Pila termoeléctrica ó termomultiplicador de Nobili

del aparato. La pila termoeléctrica constituida de este modo es un instrumento sumamente sensible; basta tocar con el dedo una de sus caras, ó hacer llegar á él por insuflación una bocanada de aire caliente, para que la aguja imanada sufra una fuerte desviación.

En igualdad de circunstancias, la intensidad de la corriente está en razón del número de soldaduras, es decir, de elementos de la pila, por cuya razón se da al aparato de Nobili el nombre de *termomultiplicador*.

Veamos ahora cómo se consigue comprobar con él la ley de la variación de la intensidad en razón inversa del cuadrado de las distancias. El experimento siguiente, hecho por Melloni, demuestra de un modo muy sencillo la exactitud de esta ley.

Se pone en una de las caras de la pila termoeléctrica un cono que limita las dimensiones del haz calorífico, y que, forrado interiormente de papel negro, no puede reflejar el calor susceptible de caer oblicuamente sobre su superficie interna. Como foco de calor radiante, se usa un vaso de hojalata con una de sus caras dada de negro de humo y lleno de agua hirviendo; la radiación de esta cara hacia la pila será la que nos sirva para verificar la ley. Colócase la pila provista de su cono enfrente de la vasija, á una distancia dada SO (fig. 619), y al punto se desvía la aguja del galvanómetro cierto

número de grados, 54° por ejemplo. Se traslada la pila á doble distancia $S'O$; la posición de la aguja subsiste invariable; continúa marcando 54° , sucediendo lo propio á cualquier otra distancia. Así pues, el efecto total de la radiación es el mismo en cada una de estas posiciones; pero las partes de la superficie de la vasija que envían rayos de calor al cono no son otra cosa sino las secciones del cono del aparato prolongadas hasta la superficie radiante; cualquier punto de una de estas secciones irradia directamente sobre la cara de la pila vuelta hacia él, del propio modo que cualquier rayo emitido por el mismo punto sobre la superficie interna ennegrecida, y á *fortiori* fuera de ella, no puede llegar á esta misma cara. Pero estas secciones son cada vez mayores; son círculos cuyos diámetros $AB, A'B'$ crecen proporcionalmente á la distancia de la pila á la vasija, y cuyas superficies van por lo tanto creciendo como los cuadrados de estas mismas distancias. Así pues, para que el efecto producido en la pila sea constante es preciso que la intensidad de la radiación disminuya en razón de dichos cuadrados. En una palabra, la disminución de la intensidad con la distancia compensa exactamente el aumento de la superficie radiante eficaz, quedando así la ley demostrada.

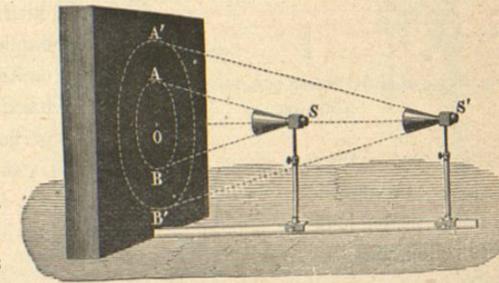


Fig. 619.—La intensidad del calor radiante varía en razón inversa de los cuadrados de las distancias. Demostración práctica

Supongamos ahora que, sin variar la distancia de la pila termoeléctrica al foco, se cambia la inclinación de la superficie radiante; que la cara ca (fig. 620), que envía un haz limitado de calor cuyos rayos salen perpendicularmente, está inclinada en $c'a'$. Si la aguja del galvanómetro sufre en el primer caso una desviación de 60° , en el segundo marcará los mismos. En una palabra, la desviación no variará, cualquiera que sea la oblicuidad de los rayos emitidos. Por consiguiente, la cantidad de calor radiado hacia la cara de la pila es también constante. Pero la porción $c'a'$ de la superficie que emite el haz oblicuo es mayor que la ca que emite el perpendicular. Es, pues, menester que la intensidad del calor emitido oblicuamente sea menor que la del radiado perpendicularmente. Para que haya compensación, la razón de estas intensidades debe ser inversa de las dimensiones de las superficies, es decir, de las líneas $c'a'$ y ca , ó directamente proporcional á ca y $c'a'$. En una palabra, la intensidad del calor emitido oblicuamente varía como el *coseno* del ángulo que forman los rayos con la perpendicular om á la superficie radiante.

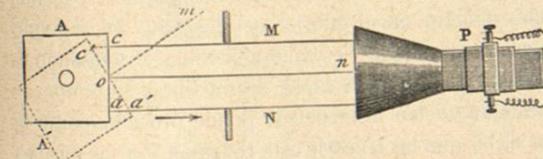


Fig. 620.—Ley de los cosenos para los rayos emitidos oblicuamente

Esta ley, formulada en principio por Lambert, la demostró Leslie con el aparato de su cubo y de su termómetro diferencial, una de cuyas bolas estaba situada en el foco de un espejo esférico, aparato de que en breve nos ocuparemos. Pero sus experimentos no comprobaron la ley sino en el caso de que la superficie estuviese dada de

negro de humo, es decir, desprovista de todo poder reflector. Y en efecto, posteriormente se ha reconocido que la ley del coseno no es exacta sino en este caso excepcional. La Provostaye y Desains la han comprobado con la pila de Nobili, que marcaba una desviación constante si la superficie radiante era el negro de humo, al paso que en otras substancias, como el vidrio, la cerusa ó el ocre rojo, la desviación de la aguja

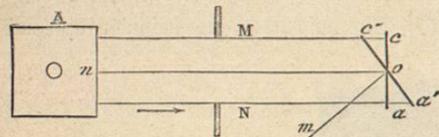


Fig. 621.—Ley del coseno para los rayos recibidos oblicuamente

galvanométrica variaba con la oblicuidad de los rayos de calor. Esta inexactitud de una ley que parece poder deducirse de un solo raciocinio tiene su explicación. Los rayos de calor que emite la superficie de un cuerpo al pasar del interior al exterior por la superficie sufren dos reflexiones, una interna y otra externa, y el calor emitido es tan sólo la diferencia entre el calor total que llega á la superficie y la porción que, reflejada interiormente, vuelve al cuerpo, y que varía probablemente con la inclinación como varía en efecto el calor exteriormente reflejado.

Por lo que hace á la ley del coseno aplicada á la intensidad del calor radiante emitido por un foco A y recibido oblicuamente por la superficie $c'a'$, es una simple consecuencia geométrica de la variación de las superficies interceptadas en un haz limitado, cuando varía la oblicuidad del plano de sección. No hay lugar á comprobarla experimentalmente.

III

REFLEXIÓN DEL CALOR

Cuando los rayos de calor dan en la superficie de un cuerpo, ó en términos más generales, cuando llegan á la superficie de separación de dos medios diferentes, su haz se divide en dos partes; una de ellas penetra en el interior del cuerpo ó del segundo medio, donde se divide á su vez en calor transmitido y en calor absorbido, atravesando la primera el cuerpo sin calentarlo, y siendo la segunda capaz de modificar su temperatura. La segunda parte del haz incidente vuelve al medio de donde procede; como la luz, sufre una reflexión. Ya hemos dicho que las leyes de esta reflexión son las mismas para los rayos de calor que para los luminosos, es decir, que *el rayo incidente y el reflejado están en un plano perpendicular á la superficie reflectora y forman el mismo ángulo con la normal en el punto de incidencia*. La comprobación experimental de esta identidad se suele hacer del modo siguiente:

Se ponen dos espejos parabólicos cóncavos, de latón bruñido, uno enfrente de otro, de modo que sus ejes principales coincidan (fig. 622). En el foco de uno de ellos se coloca un manantial calorífico, por ejemplo un cestillo de alambre que contenga brasas, y en el foco del otro una substancia inflamable, como yesca, algodón-pólvora ó pólvora. Al poco rato sobreviene la inflamación; pero el experimento no sale bien si se pone la substancia inflamable fuera del foco, aun cuando se la acercara al manantial calorífico. Semejante efecto es enteramente parecido al de la reflexión de la luz en las mismas condiciones, y sólo puede explicarse por la reunión y concentración de los rayos de calor partidos del primer foco. Su haz divergente cae sobre la superficie bruñida del

primer espejo, se refleja en ella, se transforma en un haz paralelo al eje común, se refleja de nuevo en la superficie del segundo espejo y va á convergir en el foco de éste. En una palabra, los rayos de calor siguen después de su reflexión el mismo camino que habrían seguido los luminosos emanados del mismo punto, y las propiedades geométricas de la parábola dan por consecuencia las dos leyes anteriormente formuladas: 1.ª, la coincidencia del rayo incidente y del reflejado en un mismo plano perpendicular á la superficie reflectora; 2.ª, la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexión.

El experimento de los espejos parabólicos se hace de varios modos. Por ejemplo, se puede poner en uno de los focos una bola metálica sumamente caliente, y en el otro el depósito de un pequeño termómetro. La columna mercurial sube al punto, al paso que el efecto es nulo si el termómetro no está colocado exactamente en el foco. En lugar

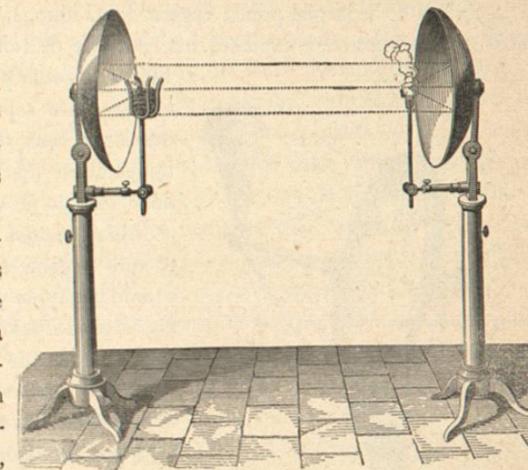


Fig. 622.—Reflexión del calor: experimento de los espejos parabólicos

de un termómetro común se hace uso también de una de las bolas del termoscopio de Rumford ó del termómetro diferencial de Leslie, con lo cual se evitan las variaciones de temperatura por que pueda pasar el medio durante el experimento, puesto que las dos bolas del instrumento están sometidas por igual á su influencia. De este modo se tiene la seguridad de que las variaciones indicadas proceden únicamente de la reflexión. Compréndese asimismo que la pila termoeléctrica de Nobili desempeñaría no menos bien este cometido, marcando con la desviación instantánea de la aguja del galvanómetro la concentración de los rayos reflejados en el espejo del segundo foco.

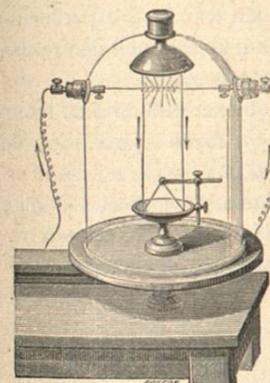


Fig. 623.—Experimento de Davy: reflexión del calor en el vacío

Los espejos parabólicos presentan la ventaja de la grande abertura que puede dárselos y que permite colocarlos á gran distancia uno de otro. Claro está que el experimento anterior no dejará de salir bien si en lugar de ellos se ponen dos espejos esféricos, y aun uno solo, con tal de colocar el cuerpo caldeado (ó la substancia inflamable) y el termómetro en dos puntos del eje que sean dos de los focos conjugados; y aun esta disposición es más ventajosa, por cuanto los rayos de calor sólo experimentan una reflexión y por consiguiente no disminuye tanto su intensidad.

Los experimentos que acabamos de relatar se hacen al aire libre; pero Davy ha efectuado otro que prueba que las leyes de la reflexión del calor son las mismas en un medio imponderable. Debajo del recipiente de la máquina neumática se ponen dos es-