

prisma de flint-glass. Haciendo que el espectro solar se formé en una hoja de papel ennegrecido, sobre la cual se había esparcido alcohol, aquel eminente físico determinó el poder calefaciente del espectro por su poder vaporizante ó secante, y vió que la superficie mojada formaba al secarse una serie de manchas que representaban máximas térmicas, separadas entre sí por espacios de una intensidad calorífica relativamente débil. No se han observado máxima y mínima semejantes en el espectro de la luz eléctrica, ni en el de un alambre de platino calentado al blanco por una corriente voltaica.,,

Los vacíos encontrados por Herschel en el espectro solar dimanaban probablemente de la absorción electiva que ejercen las capas de nuestra atmósfera, y quizás también la de la solar en las radiaciones caloríficas de la fotosfera. El astrónomo americano S. Langley se ha ocupado recientemente de la misma cuestión, de la cual volveremos á tratar más adelante cuando nos ocupemos de la energía de la radiación solar.

### CAPÍTULO XIII

#### PROPAGACIÓN DEL CALOR.—CONDUCTIBILIDAD

##### I

##### CONDUCTIBILIDAD DE LOS CUERPOS SÓLIDOS HOMOGÉNEOS

Hemos visto que si se tiene en la mano una barra de hierro cuyo extremo se haya metido en un foco incandescente, el calor del foco se comunica al metal, se propaga de molécula en molécula á lo largo de la barra, y al poco rato la temperatura se eleva hasta el punto de quemar la mano y de obligarla á soltar el hierro. Si en lugar de ser la barra de este metal fuese de cualquier otro, pero de diámetro y longitud iguales, se observaría análogo efecto, si bien veríamos variar á la vez el tiempo que invierte en ponerse á cierta temperatura un punto situado á una misma distancia de la extremidad caldeada en cada barra, y la distancia del punto más alejado de cada una de ellas susceptible de adquirir una temperatura determinada. He aquí un experimento muy sencillo que hará patente la diferencia de que hablamos:

Tomemos dos barras de iguales dimensiones, una de cobre y otra de hierro, y peguemos á ellas con cera y á distancias iguales de los extremos unas bolitas de madera. Pongamos en seguida las barras punta con punta y calentemos los extremos contiguos por medio de una lámpara de espíritu de vino puesta debajo del punto de unión. Al poco rato veremos que caen las bolas unas tras otras, á medida que derrite la cera el calor que se propaga en cada barra por vía de conductibilidad; mas al cabo de un período de tiempo determinado veremos que el número de bolas caídas en la barra de cobre es mayor que el de la de hierro. Por otra parte, dos bolas de la misma fila, situadas por consiguiente á igual distancia del foco, no caen simultáneamente. Prescindamos por un momento de la rapidez con que se ha propagado el calor á lo largo de la barra, para ocuparnos únicamente del primer efecto, es decir, de la distancia á que puede llegar en ambos metales cierto grado de temperatura, que en el caso presente es el de la fusión de la cera. Como esta distancia resulta menor en el cobre, dícese de él que es *mejor conductor* del calor que el hierro.

La figura 641 representa un aparato inventado por Ingenhouz y modificado por Gay-Lussac, cuyo aparato sirve para comparar entre sí los poderes conductores de los cuerpos sólidos. Consiste en unas varillas cilíndricas de cada una de las substancias que se han de comparar y que están dadas de una capa de cera del mismo espesor, colocadas horizontalmente de modo que por uno de sus extremos penetran en un baño de aceite ó de agua hirviendo mientras el extremo opuesto sale fuera de la caja que contiene uno de ambos líquidos. El calor de éste corre por la varilla, y derrite la cera á distancias tanto mayores cuanto más considerable es la conductibilidad de la substancia de que aquélla está formada.

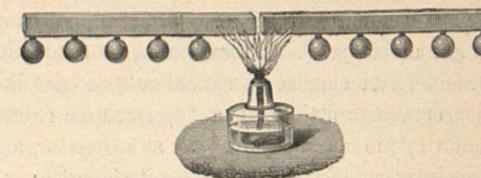


Fig. 640.—Desigual conductibilidad del cobre y del hierro

Fourier ha procurado determinar en su *Teoría del calor*, por el análisis matemática, la ley de propagación del calor por conductibilidad en los sólidos homogéneos. Partiendo del hecho práctico de que el calor emitido por un cuerpo no tan sólo procede de las moléculas superficiales, sino también de las situadas debajo de la superficie á cierta profundidad, admite que las partículas interiores son otros tantos centros radiantes que envían calor en todas direcciones. Dos partículas cualesquiera, suficientemente próximas, cambian así rayos de calor, y en virtud de este cambio

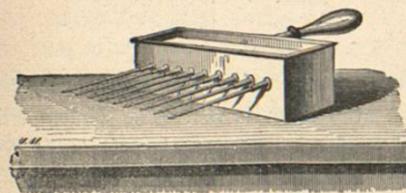


Fig. 641.—Aparato de Ingenhouz para medir poderes conductores

la más fría gana cierta cantidad de calor que, en igualdad de circunstancias, debe ser proporcional al exceso de las dos temperaturas. Esto es lo que lleva el nombre de hipótesis de la *radiación particular*. ¿Puede explicar esta hipótesis el modo cómo se propaga el calor por el interior de los cuerpos atermos, ó por vía de conductibilidad? Dicho geómetra ha tratado de demostrarlo así sometiendo la cuestión al cálculo. Hízolo primeramente con respecto á una pared sólida, comprendida entre dos planos paralelos indefinidos, cuyas dos caras están mantenidas á temperaturas desiguales mediante dos focos constantes; cuando se establezca el equilibrio entre las temperaturas de las diferentes capas, cuando todas ellas estén atravesadas por la misma cantidad de calor al mismo tiempo, se llamará *coeficiente de conductibilidad* del cuerpo á este calor llevado á la unidad de tiempo, á la unidad de superficie y á la unidad de espesor. Partiendo Fourier de la ley que rige este caso general, ha formulado la de la propagación en una barra rectangular indefinida, y luego en una de longitud determinada, única en que se pueden hacer comprobaciones experimentales. Vamos á indicar, mencionando los experimentos de Despretz, cuál es esta ley.

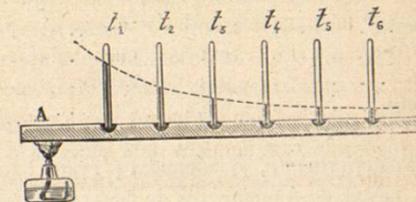


Fig. 642.—Medida de la conductibilidad de una barra. Experimento de Despretz

Véase cómo procedía este físico. Las barras de diferentes metales de que se valía

tenían una sección cuadrada de 21 milímetros de lado: á distancias iguales de 10 centímetros tenían cavidades de 6 milímetros de diámetro y de 14 de profundidad, que se llenaban de mercurio y en las cuales estaban metidos los depósitos de otros tantos termómetros muy sensibles. Un quinqué calentaba uno de los extremos de la barra en que se hacía el experimento, y un termómetro muy sensible marcaba la temperatura del aire ambiente. A las pocas horas, las temperaturas marcadas por los termómetros quedaban estacionadas y se anotaba la de cada uno de ellos. Esto sentado, véase cómo Despretz comprobaba la ley. Tomemos los resultados dados por una barra de cobre. Siendo 17°,08 la temperatura del aire exterior, los números siguientes son los de las temperaturas de los termómetros estacionarios:

	Temperaturas	Exceso sobre el aire	
1er termómetro. . . . .	85,44	66°,36	2,14
2.º — . . . . .	63,36	46°,28	2,15
3.º — . . . . .	49°,90	32°,62	2,11
4.º — . . . . .	41°,40	24°,32	2,17
5.º — . . . . .	35°,71	18°,63	
6.º — . . . . .	33°,26	16°,18	

Siendo de 10 centímetros la distancia entre dos termómetros consecutivos, sus distancias al foco de calor están en progresión aritmética; los excesos de sus temperaturas sobre las del aire forman una serie geométrica, porque *el cociente de dos términos consecutivos es constante*, como se ve en la tercera columna del cuadro:  $\frac{66,36}{46,28} = 1,4$ ;  $\frac{46,28}{32,62} = 1,4$ ;  $\frac{32,62}{24,32} = 1,4$ , y así sucesivamente. *El cociente de la suma de dos excesos por el exceso intermedio es también constante*, como lo demuestra la cuarta columna: 2,14 es el cociente de  $66,36 + 32,62$  por el exceso intermedio 46,28; 2,15 lo es de  $46,28 + 24,32$  por 32,62, y así sucesivamente.

Operando con barras de varios metales, dadas de un barniz para igualar las pérdidas por radiación, Despretz dedujo las relaciones de los coeficientes de dilatación. He aquí sus resultados:

Oro. . . . .	1000	Hierro.. . . .	374,3	Mármol. . . . .	23,6
Platino.. . . .	981	Cinc. . . . .	363,0	Porcelana.. . . .	12,2
Plata. . . . .	973	Estaño.. . . .	303,9	Tierra de hornos.. . . .	11,4
Cobre.. . . .	898,2	Plomo.. . . .	179,6		

Posteriormente, Wiedemann y Franz han hecho estudios sobre el mismo asunto. Sus barras, de 6 milímetros de diámetro y 50 centímetros de longitud, estaban plateadas y bruñidas. Se tomaba la temperatura de sus diferentes puntos con la pila termoeléctrica para evitar la alteración producida por las cavidades en la conductibilidad de las barras, cuya homogeneidad la rompía el mercurio. Las cifras deducidas por dichos sabios son las siguientes:

Plata. . . . .	1000	Cinc.. . . .	190	Plomo. . . . .	85
Cobre. . . . .	776	Estaño. . . . .	145	Platino. . . . .	84
Oro.. . . .	532	Hierro. . . . .	119	Paladio.. . . .	63
Latón. . . . .	236	Acero. . . . .	116	Bismuto.. . . .	18

Es de notar que los números que sirven de medida para las cantidades caloríficas de los metales son casi los mismos que los que sirven para expresar sus conductibilidades eléctricas.

De todos los cuerpos sólidos, los metales son los mejores conductores del calor, exceptuando el bismuto. La piedra, el vidrio, el mármol, la porcelana, los óxidos, las tierras, lo son mucho menos que los metales, y por último, la madera y el carbón vegetal preparado á baja temperatura, es decir, no calcinado, y en general las sustancias orgánicas, los frutos carnosos, las plantas grasas, y los tejidos de los vegetales y de los animales son malos conductores.

“La madera, dice Despretz, es un conductor tan imperfecto, que en un experimento en que quise comparar su propiedad conductora con la del hierro, quemé una vara de roble por uno de sus extremos, sin poder calentarla á pocas pulgadas de distancia.”

Por las cifras anteriores, se ve además la diferencia que existe entre las conductibilidades de varios metales. “Se puede hacer ostensible esta diferencia, dice Tyndall, de un modo muy sencillo, introduciendo los extremos de dos cucharas, una de plata alemana y otra de plata legítima, en un mismo vaso de agua caliente. Al poco rato se verá que el extremo libre de la segunda se ha calentado mucho más que el de la primera; y si se ponen dos pedazos de fósforo en los mangos de las dos cucharas, se fundirá é inflamará más pronto el de la cuchara de plata buena, al paso que el calor transmitido al través de la otra jamás llegará á tener la suficiente intensidad para inflamar el fósforo.” La razón de estos hechos está en la desigualdad del poder conductor de una y otra plata, pues siendo 100 el de la una, sólo es de 60 el de la otra.

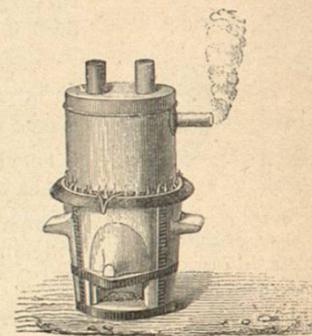


Fig. 643.—Experimento sobre la conductibilidad del hierro comparada con el bismuto.

Otra circunstancia nos probará que la conductibilidad de una sustancia no depende de la mayor ó menor rapidez con que el calor se propaga por su interior. Se toman dos cortos cilindros del mismo volumen, uno de hierro y otro de bismuto, y después de dar una capa de cera blanca á las bases de ambos cilindros, se los coloca sobre la tapadera de una vasija llena de agua caliente, con las bases cubiertas de cera puestas hacia arriba. El calor de la vasija se propaga por cada cilindro, y la cera llega á derretirse en ambos; pero la fusión empieza por el bismuto. Mas, según el cuadro precedente, la conductibilidad de este metal es seis veces menor que la del hierro: ¿cuál es, pues, la razón del fenómeno observado? Consiste en que para elevar el mismo peso de los dos metales á igual temperatura, se necesita próximamente cuádruple calor para el hierro, que para el bismuto. El calor que el primero recibe se invierte en gran parte en elevar su temperatura, lo cual explica la lentitud relativa con que se propaga por su masa. Para comparar los poderes conductores del hierro y del bismuto, es menester tomar dos barras del mismo diámetro, medir las distancias al foco de calor de las secciones que tienen igual temperatura en el momento del equilibrio y sacar los cuadrados de los números que representan estas distancias, los cuales servirán de medida para los dos poderes conductores.

## II

## CONDUCTIBILIDAD DE LOS CUERPOS CRISTALIZADOS

En todo cuanto acabamos de decir, se trata de cuerpos homogéneos. En los sólidos cuya estructura no es idéntica en todos sentidos—por ejemplo, los cristales birrefringentes, el espato, el cuarzo, etc.—la conductibilidad varía según el sentido de propagación del calor; existe una analogía completa entre el modo cómo se propaga el calor en estos cuerpos y el relativo al movimiento de la luz. Así por ejemplo, si se toman dos placas de cuarzo talladas, una paralela y otra perpendicularmente al eje óptico, y se las cubre de una tenue capa de cera virgen, y después de taladrarlas se pasa por el agujero un alambre caldeándolo con una corriente eléctrica, la cera se derrite alrededor del punto en que se ha aplicado el calor: mas al paso que la capa que limita la cera derretida es una elipse en la primera placa, es en la segunda un círculo perfecto (fig. 644), lo cual demuestra la desigual conductibilidad del cuarzo en ambos sentidos.

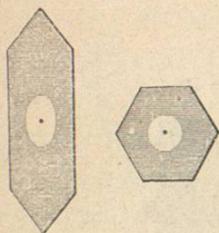


Fig. 644.—Desigual conductibilidad del cuarzo en direcciones diferentes.

Senarmont hizo los primeros estudios profundos acerca de la conductibilidad del calor en los cristales y el procedimiento de observación que acabamos de describir, excepto el modo de suspensión y caldeo de la placa. Dicho físico colocaba la placa cristalina en la punta de un tubo de plata aguzado en forma de cono, y hacía pasar por el tubo una corriente de aire caliente que caldeaba así el cristal por su centro. “La fusión de la cera, dice, representaba gráficamente la marcha del calor, y á cada momento trazaba en la placa la forma de una curva isoterma.” Después de cerciorarse de que estas curvas eran circulares en las láminas homogéneas de vidrio ó de metal, Senarmont operó con placas de cuarzo ó de espato calizo talladas perpendicularmente al eje de simetría, lo cual le dió también curvas circulares, según hemos dicho más arriba, y luego con placas paralelas á dicho eje, en cuyo caso las curvas presentaban una elipticidad pronunciada, estando el diámetro mayor de la elipse dirigido siempre en el sentido del eje de simetría.

Aplicando este método á cristales de varios sistemas, Senarmont ha formulado varias leyes que prueban que hay identidad completa entre el modo de propagación del calor y el de la luz en los cuerpos cristalizados (1).

Desde la época (1877) en que Senarmont publicó el resultado de sus trabajos, Jan-

(1) He aquí, según el autor, un resumen de estas leyes: 1.º, en los cristales de sistema regular la conductibilidad es igual en todos los sentidos, y las superficies isotermas son esferas concéntricas al foco de calor, como en los medios homogéneos; 2.º, en los cristales de sistema prismático recto de base cuadrada, la conductibilidad adquiere un valor máximo ó mínimo paralelamente al eje de figura; las superficies isotermas son elipsoides de revolución alargados ó aplanados; 3.º, en los sistemas de cristales que se refieren al prisma rectangular recto, la conductibilidad adquiere tres valores principales que siguen direcciones paralelas á las aristas del prisma; las superficies isotermas son elipsoides de tres ejes desiguales concéntricos al foco de calor; 4.º, en los cristales que se refieren al prisma rectangular de base oblicua, las superficies isotermas son elipsoides de tres ejes desiguales, teniendo uno solo de ellos una posición determinable *à priori*, la de la arista del prisma perpendicular á los otros dos. Para más detalles, véase la Memoria de Senarmont en los *Anales de física y química* (3.ª serie, tomos XXI y XXII) ó las *Actas de la Academia de Ciencias de 1847*.

netaz ha hecho extensiva la misma clase de estudios á mayor número de cristales, perfeccionando el procedimiento antes descrito, y empleando otro método en el cual no hay necesidad de taladrar la placa cristalina. Aparte de ver confirmadas las leyes descubiertas por su eminente predecesor, y de obtener muchas medidas de los ejes de las elipses isotermas, Jannetaz ha logrado establecer una relación interesante entre las líneas de conductibilidad máxima y mínima y los clivajes de los cristales. Por ejemplo, en los de un eje, el de mayor conductibilidad es paralelo al clivaje más fácil.

Los vegetales presentan, como los cristales, diferencias de conductibilidad calorífica, según el sentido en que se verifica la propagación, siendo verosímil que la causa de estas diferencias tenga cierta analogía con la que acabamos de tratar, es decir, que proceda de la falta de homogeneidad de estas substancias. Las primeras investigaciones acerca de este asunto las hicieron dos sabios ginebrinos, de Candolle y de la Rive, los cuales estudiaron la conductibilidad de varias maderas resinosas, ya en el sentido de las fibras vegetales, ó ya en dirección perpendicular. Por lo general, el poder conductor es más débil en esta última dirección que en la primera, y en el roble la relación es de 3 á 5. La diferencia parece más marcada en las maderas blandas que en las duras. Tyndall ha estudiado la misma cuestión comparando la conductibilidad en tres direcciones diferentes, paralelamente á las fibras, en un sentido perpendicular á éstas y á las capas leñosas á la vez, y por último en dirección perpendicular á las fibras, pero paralela ó más bien tangente á las capas. Los resultados obtenidos por este sabio confirman los de de Candolle y de la Rive: la conductibilidad de la madera es mayor en dirección de las fibras, como también lo es más en sentido perpendicular á las capas leñosas que en el paralelo. Hay que añadir que el método adoptado por Tyndall no da la conductibilidad misma, sino tan sólo la velocidad de propagación del calor, y ya hemos visto anteriormente que convenía no confundir ambas propiedades. El físico inglés ha visto además que esta velocidad de transmisión es todavía menor en la corteza que en la madera misma, y considerando sin duda que los resultados obtenidos por él podían aplicarse á los poderes conductores, dedujo de ellos que la corteza de los árboles es una especie de vaina ó forro protector que permite al vegetal arrostrar la sustracción repentina del calor interior así como la irrupción súbita del exterior. De la Rive y de Candolle habían hecho ya observar que el escaso poder conductor de la madera en dirección lateral es favorable para la conservación del calor que el árbol recibe del suelo, y nosotros añadiremos que esta influencia propicia debe aumentar aún á causa de la circulación de la savia, puesto que, según veremos, los líquidos conducen muy imperfectamente el calor.

La desigual conductibilidad de los diferentes sólidos se aprovecha en una porción de aplicaciones. Las herramientas y utensilios de metal, cuyo uso requiere que se los someta á una temperatura elevada, están provistos de mangos malos conductores, por ejemplo de madera, que detienen casi completamente la propagación del calor. Los tejidos de algodón, los de seda y sobre todo los de lana son muy malos conductores, y por tanto muy á propósito para preservar el cuerpo de los excesos de calor y de frío. En verano impiden que el calor exterior penetre hasta la superficie de nuestro cuerpo, y en invierno, por el contrario, no dejan salir el que éste conserva, por la dificultad que oponen los vestidos á su propagación al exterior. Por lo demás, no es la substancia de que están compuestos la única que da á los tejidos esta propiedad preciosa, sino también su estructura; entre los filamentos hay interpuestas capas de aire que permanecen inmóviles y conducen mal el calor, lo propio que los gases en reposo,