

dirección del eje principal y el otro á la dirección normal. El circón, el cuarzo, la cal carbonatada ó espato de Islandia, la turmalina y la esmeralda corresponden á este segundo sistema. Por último, la tercera clase comprende los cristales que tienen tres ejes desiguales, diferentes por sus propiedades, como el topacio, el sulfato de magnesia, el feldespato, y el yeso ó sulfato de cal. Estos cristales tienen tres coeficientes desiguales de dilatación, ya según su eje, ó ya según otras direcciones.

Mediante un sencillo experimento, se puede comprobar esta desigualdad de dilatación de los cristales, con un fragmento de yeso de la variedad conocida con el nombre de *yeso hierro de lanza*, que se encuentra especialmente en las canteras de los alrededores de París. En uno de estos fragmentos se talla una lámina terminada en dos caras planas y tersas perpendicularmente á la línea media que divide el cristal, y en seguida se la calienta á la temperatura de 80° por ejemplo. Entonces se nota fácilmente la deformación que la desigualdad de dilatación ha producido en ambas caras, las cuales han dejado de ser planas. Procurando ver por reflexión un objeto suelto y fino, por ejemplo un hilo, en una de ellas como en un espejo, se ven dos imágenes del hilo, lo que no sucedería si la cara hubiese continuado siendo plana como lo era antes de elevar la temperatura.

M. Fizeau ha determinado los coeficientes de dilatación de gran número de cristales valiéndose de un método óptico especial, que consiste en obtener los anillos coloreados de Newton por la superposición de un plano de vidrio y de una lámina tenue del cristal, y luego en observar la dislocación de las franjas que resulta cuando se eleva la temperatura. Estudiando por este concepto las sustancias compuestas cristalinas que pertenecen al grupo de los cloruros, bromuros y yoduros metálicos, M. Fizeau no tan sólo ha reconocido su gran dilatabilidad que excede á la de los metales más dilatables, sino que también ha podido hacer patente una anomalía singular presentada por una de dichas sustancias, el yoduro de plata. Este compuesto que, según hemos visto, ha desempeñado tan gran papel en la invención de la fotografía, está formado de 54,02 partes de yodo y 45,98 de plata. Véase en qué términos anunciaba el sabio físico el caso á que nos referimos:

“El yoduro de plata, no tan sólo posee la gran dilatabilidad de sus congéneres, sino que por este concepto presenta con ellos un contraste tan completo como inesperado. En efecto, de las varias pruebas á que se le ha sometido parece resultar con toda certeza que el yoduro de plata posee la propiedad de contraerse ó de disminuir de volumen cuando sube la temperatura, y de dilatarse, por el contrario, ó de aumentar de volumen cuando ésta baja, siendo siempre el fenómeno perfectamente regular y continuo entre los límites de temperatura de -10° y $+70^{\circ}$. Conviene observar que el yoduro de plata no es fusible sino á una temperatura elevada (á los 400°), de suerte que no se pueden atribuir los efectos en cuestión á las irregularidades que pudieran producirse en los límites de la temperatura correspondiente al cambio de estado de la sustancia. Por lo demás, los efectos son bien constantes y exactamente inversos uno de otro durante el calor y el enfriamiento.

„Así pues, la dilatación del yoduro de plata se debe expresar con un coeficiente negativo, á lo menos para todo el intervalo comprendido entre -10° y $+70^{\circ}$. Además, á medida que la temperatura se eleva entre estos límites, el valor numérico del coeficiente aumenta notablemente, de suerte que la contracción se ha efectuado en todas direcciones, y el coeficiente negativo ha resultado igual á $-0,000000139$ y $-0,000000137$. El yoduro de plata cristalizado se contrae en la dirección del eje principal y se dilata

normalmente á esta dirección; pero el primer coeficiente es $-0,00000367$ y el segundo $+0,00000065$, de suerte que en definitiva hay disminución de volumen.

Por el hecho de aumentar el calor el volumen de los cuerpos, disminuye su densidad; por consiguiente, al determinar esta última á temperaturas diferentes por los procedimientos que hemos descrito, se podría deducir de los resultados obtenidos el valor del coeficiente de dilatación cúbica. Y en efecto, de este modo ha sido fácil cerciorarse de un hecho sobre el cual se abrigaban dudas en otro tiempo; nos referimos á la contracción del hielo por el frío; hasta se había creído reconocer que el hielo se dilata á medida que baja su temperatura. Pero las medidas de la densidad de esta sustancia obtenidas por Brüner al evaluar la pérdida de peso en el aceite de petróleo de un mismo trozo de hielo exento de burbujas de aire á 0° y á -6° , han dado por coeficiente de dilatación linear un número mayor que para los otros sólidos conocidos, según se ha podido ver ya en lo que concierne á los cuerpos continuados en el cuadro de la página 576. Posteriormente, Géissler y Plücker han deducido $0,0000528$, cifra que pasa en dos tercios del coeficiente del zinc, el más dilatado de los metales.

CAPITULO IV

DILATACIÓN DE LOS LÍQUIDOS

I

DETERMINACIÓN DE LA DILATACIÓN ABSOLUTA DEL MERCURIO

Comparando entre sí los resultados consignados en los diferentes artículos del capítulo anterior, se ve fácilmente que los cuerpos sólidos, amorfos ó cristalizados, distan mucho de seguir la misma ley en sus cristalizaciones. Sus variaciones de volumen para un mismo cambio de temperatura no tan sólo difieren considerablemente de un cuerpo á otro, sino también, en un mismo cuerpo, cuando se consideran variaciones iguales de la temperatura en diferentes puntos de la escala termométrica. ¿Cuál es la verdadera significación de estos resultados?

Para hacerse cargo de ellos, debe tenerse en cuenta que la medida de las temperaturas, tal como resulta de la construcción y graduación del termómetro de mercurio, es necesariamente arbitraria ó convencional. Un grado centígrado indica, bien una dilatación si la temperatura se eleva, ó bien una contracción si baja, igual á la 6480^{a} parte del volumen del mercurio al hielo fundente, aunque en uno y otro caso interviene también la dilatación ó contracción del vidrio. Así pues, decir que el coeficiente de dilatación de un cuerpo sube con la temperatura, es simplemente reconocer que la ley de dilatación de este cuerpo no es, con respecto á aumentos iguales de temperatura, la misma que la ley de dilatación del mercurio. Pero esto nada prejuzga relativamente á la ley, hasta aquí desconocida, que puede enlazar las indicaciones del termómetro, ó las variaciones de volumen de los sólidos medidos con las cantidades reales de calor que producen estos diferentes efectos.

También sabemos ya que encontraremos divergencias semejantes en los líquidos, porque hemos visto que ciertos termómetros construídos y graduados según el principio

del termómetro de mercurio, pero llenados con líquidos diferentes, no concuerdan cuando se los somete á temperaturas distintas de las de los puntos fijos comunes. Los líquidos, pues, lo mismo que los sólidos, no tienen los mismos coeficientes de dilatación, y las dilataciones de aquéllos obedecen á diferentes leyes que la del mercurio.

Es tanto más importante cerciorarse de estas diferencias y comprobarlas con medidas exactas cuanto que, al hablar de la dilatación del mercurio ó de la de los demás líquidos, no hemos tenido en cuenta su *dilatación real ó absoluta*, sino tan sólo su *dilatación aparente*, puesto que no se han considerado las variaciones de volumen que experimenta la envoltura que los contiene. La cantidad que ha resultado, $\frac{1}{6480}$, expresa la dilatación aparente del mercurio, es decir, su dilatación absoluta deducida de la del cristal. Muchos físicos, entre los cuales haremos mención de Dalton, Cavendish, Deluc,

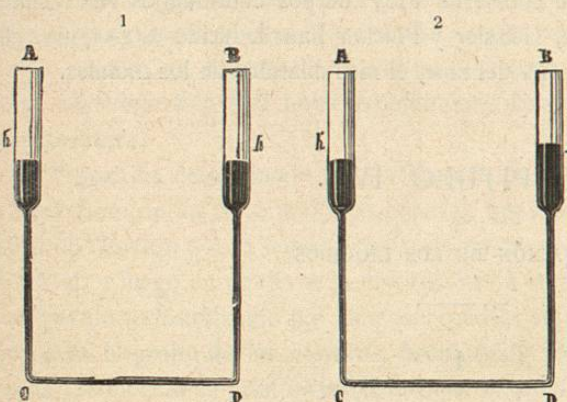


Fig. 546.—Principio del método de determinación de la dilatación absoluta de un líquido

Lavoisier y Laplace, han medido dicha dilatación haciendo varios experimentos, pero sin pasar de la temperatura de 100°.

Unas veces agregaban la dilatación del vidrio á la aparente, y otras medían directamente la dilatación absoluta, midiendo la altura del mercurio en el barómetro á una misma presión, pero á diferentes temperaturas. Dulong y Petit han resuelto esta cuestión por un método que vamos á describir sucintamente, basado en un principio

muy sencillo que Boyle había enunciado ya en los siguientes términos: *Cuando dos columnas verticales de un mismo líquido á dos temperaturas diferentes se equilibran, sus alturas están en razón inversa de sus densidades.* Pero como estas densidades varían á su vez en razón inversa de los volúmenes, resulta que las variaciones de volumen podrán medirse por las de altura.

Consideremos dos tubos verticales AB, que comunican por un tubo horizontal CD y que contienen mercurio. Si los dos tubos y el líquido contenido en ellos están á igual temperatura, á 0° por ejemplo, sus niveles superiores estarán á la misma altura vertical (fig. 546, 1). Supongamos ahora que continuando el tubo A á 0°, se eleva la temperatura del tubo B, y admitamos que el horizontal CD tenga un diámetro bastante pequeño para impedir la mezcla de las masas líquidas desigualmente calentadas. En tales condiciones, el nivel del mercurio subirá en B sobre el nivel del mismo líquido en A (figura 546, 2), y llamando h y h' á las alturas de las dos columnas verticales sobre el eje del tubo horizontal, y d y d' á las densidades del mercurio, se tendrá, en virtud del principio más arriba enunciado, $\frac{d}{d'} = \frac{h'}{h}$. Si el volumen del mercurio á 0° fuese V en el tubo B, sería V' á la nueva temperatura á que se ha elevado el líquido, con lo cual resultaría $\frac{d}{d'} = \frac{V'}{V}$; de donde $\frac{V'}{V} = \frac{h'}{h}$ y por consiguiente $\frac{V'-V}{V} = \frac{h'-h}{h}$. Ahora bien, el primer término $\frac{V'-V}{V}$ expresa la relación entre el aumento de volumen ó dilatación

absoluta del mercurio y este mismo volumen á 0°. Esta es la dilatación de la unidad de volumen del mercurio para el número de grados comprendidos entre 0° y la temperatura á que se ha elevado el tubo B. Sea t° esta temperatura; dividiendo por t , se tendrá el *coeficiente de dilatación absoluta del mercurio* para 1° entre 0° y t° .

Así pues, el método ideado por Dulong y Petit consiste en sustituir la medida de los volúmenes con la de las alturas de dos columnas verticales de mercurio desigualmente calentadas. Para tener toda la precisión posible, sólo requiere dos condiciones esenciales: la primera consiste en medir rigurosamente la altura vertical de una columna de mercurio, así como la diferencia de esta altura con una columna vertical inmediata. La segunda condición es determinar con exactitud la temperatura del mercurio de la columna calentada, continuando la otra á la temperatura del hielo fundente.

La figura 547 hará comprender cómo dispusieron Dulong y Petit sus experimentos, de modo que realizaran en lo posible ambas condiciones. El tubo horizontal que ponía en comunicación los dos brazos verticales que contienen mercurio estaba fijo en una fuerte barra de hierro que descansaba en tres pies sobre una mesa de madera provista de tornillos de nivel. Unos niveles de aire servían para obtener la perfecta horizontalidad del tubo. Uno de los brazos verticales B estaba provisto de un manguito lleno de hielo machacado, y el montante que lo sostenía terminaba por su extremo superior en una punta i que servía de mira. El otro brazo A estaba rodeado de un manguito de cobre enteramente lleno

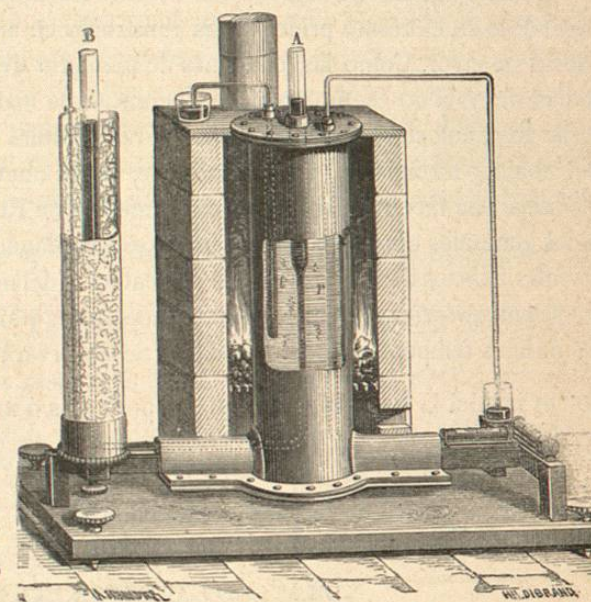


Fig. 547.—Aparato de Dulong y Petit para determinar la dilatación absoluta del mercurio



Fig. 548.—Dilatación cúbica de los sólidos por el termómetro de peso

de un aceite fijo, cuya temperatura podía elevarse hasta 300°. A este efecto, un hornillo (cuya mitad anterior se ha quitado en la figura 547) rodeaba por todas partes el manguito y servía para elevar su temperatura. Cuando se quería observar, se cerraban todas las

aberturas del hornillo y la temperatura del baño de aceite quedaba en breve estacionaria. Entonces con un catetómetro se determinaba la altura del punto de mira i , la del nivel del mercurio en el tubo B (observado al través de una ranura del manguito) y la del nivel del mercurio en el brazo A que sobresalía cosa de medio milímetro de la tapadera del manguito. De este modo se obtenía la diferencia de las alturas $h' - h$. Siendo 0° la temperatura del manguito de hielo machacado, sólo restaba conocer la del baño de aceite, marcada á la vez por un termómetro de mercurio, uno de peso y uno de aire. El promedio de sus indicaciones convenientemente corregidas daba la temperatura.

Después de varias observaciones han averiguado Dulong y Petit el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio que resultó constante é igual á $\frac{1}{5550}$ por cada grado del termómetro comprendido entre 0° y 100°. También reconocieron que este coeficiente se aumentaba de un modo sensible con la temperatura á medida que ésta pasaba de 100°.

Víctor Regnault ha reproducido después los experimentos de estos sabios físicos, y basándose en el mismo principio, ha construido un aparato con el cual se evitan varias causas de error. Como las columnas de mercurio del aparato de Dulong y Petit sólo tenían de 50 á 60 centímetros, sus diferencias de nivel eran muy exiguas; en el aparato de Regnault su longitud es triple. La temperatura del aceite del manguito, calentado por abajo y no agitado, no era uniforme; en los nuevos experimentos un agitador remediaba este inconveniente. Los experimentos de Regnault han confirmado los resultados generales obtenidos por sus predecesores, dando al propio tiempo valores numéricos más exactos de los coeficientes de dilatación del mercurio. El cuadro siguiente da los coeficientes *medios* entre 0° y varias temperaturas y los coeficientes *verdaderos* para estas mismas temperaturas determinadas. Se observará que el coeficiente medio de 0° á 50° es igual á la fracción $\frac{1}{5547}$, que es poco más ó menos el número dado por Dulong y Petit de 0° á 100°. Así pues, entre los límites en cuestión se continúa haciendo uso del valor $\frac{1}{5550}$, fácil de retener en la memoria.

DILATACIÓN ABSOLUTA DEL MERCURIO

Coeficiente medio para las temperaturas		
de 0° á	50°	0,00018027
de 0° á	100	0,00018153
de 0° á	150	0,00018279
de 0° á	200	0,00018405
de 0° á	250	0,00018531
de 0° á	300	0,00018658
de 0° á	350	0,00018784

Coeficiente verdadero		
á	0°	0,00017901
á	50	0,00018152
á	100	0,00018305
á	150	0,00018657
á	200	0,00018909
á	250	0,00019161
á	300	0,00019413
á	350	0,00019666

El conocimiento de la dilatación absoluta del mercurio ha permitido á Dulong y Petit averiguar la dilatación cúbica de varios metales, como el hierro, el platino, el cobre, etc. Para este último metal, que ataca el mercurio, era preciso oxidar previamente su superficie, para lo cual se servían de un tubo de vidrio de punta aguzada y curva, de la misma forma que el que sirve para el termómetro de peso.

Antes de soldar el vástago del tubo, se introduce en él un cilindro de metal con salientes de modo que sólo toquen las paredes en algunos puntos. Llénase el aparato de mercurio que se seca por ebullición, luego se le deja enfriar á 0°, sumergiendo la punta en mercurio seco. Entonces se le pesa, y deduciendo del peso obtenido el del metal y el del tubo, se tiene el peso del mercurio introducido. Conocidas las densidades del metal y del mercurio á 0°, se deduce de ellas sus volúmenes, cuya suma es evidentemente igual á la capacidad interior del aparato á la misma temperatura de 0°.

Supongamos ahora que se eleva el todo á una temperatura T, metiendo el aparato en un baño de aceite á esta temperatura, y que luego se recoge y se pesa el mercurio que sale por la punta. Claro está que el volumen de mercurio salido es igual al aumento de volumen del mercurio y del metal, deducido el de la envoltente. Escribese esta igualdad ó esta ecuación, en la cual no hay más que una incógnita, el coeficiente de dilatación cúbica del metal, y cuya resolución no ofrece por lo demás dificultad alguna.

Hemos visto que el coeficiente de dilatación aparente del mercurio es igual á $\frac{1}{6480}$; el de la dilatación absoluta á $\frac{1}{5550}$. La diferencia $\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480}$ dará la dilatación de la envoltente ó del vidrio para los mismos límites de temperatura 0° y 100°. El cálculo da $\frac{1}{38700}$ ó en decimales 0,0000258, que es la dilatación cúbica del vidrio blanco á base de sosa.

II

DILATACIÓN CÚBICA DE CUALESQUIERA LÍQUIDOS

Acabamos de ver cómo, una vez conocida la dilatación absoluta del mercurio, se puede deducir de ella la del vidrio, basándose en la sencilla relación de que la dilatación aparente de un líquido es sensiblemente igual á su dilatación absoluta deducida de la de la envoltente que lo contiene. La misma relación va á permitirnos ahora medir la dilatación absoluta de los líquidos sin necesidad de hacer de nuevo los delicados experimentos que han servido para el mercurio.

Con tal objeto se hace uso de una envoltente barométrica graduada en divisiones de capacidad igual, como se hace para construir un termómetro patrón, y se mide exactamente el volumen del depósito tomando por unidad una de estas partes. Introdúcese en él el líquido que se ha de estudiar; se mete el aparato en un manguito que contiene hielo fundente; se anota la división á la que sube el nivel, y de este modo se tiene el volumen del líquido á 0°. Hecho esto, se le pasa á un baño de temperatura conocida, y se anota también la división del tubo á la cual llega el líquido, deduciéndose de aquí el volumen á esta nueva temperatura. La diferencia de los volúmenes referida al volumen á cero da la dilatación aparente del líquido en el vidrio de la envoltente. Si se ha determinado previamente la dilatación del vidrio, una simple suma dará la dilatación real para el intervalo de las temperaturas observadas.

Deluc fué el primero que hizo experimentos exactos sobre este asunto, aunque á la verdad sin tener en cuenta la dilatación de las envoltentes, que creía despreciable en comparación de la de los líquidos; y reconoció que si se calcula la dilatación para un grado, no es constante, sino que crece á medida que la temperatura se eleva. Gay-Lussac, Thomson, Dalton y últimamente Isidoro Pierre han estudiado la dilatación de los

líquidos de varios modos. El método de que se ha valido este último para estudiar la de muchos líquidos diferentes, es el que hemos resumido más arriba, y la figura 549 representa el aparato que ha discurrido para estas investigaciones.

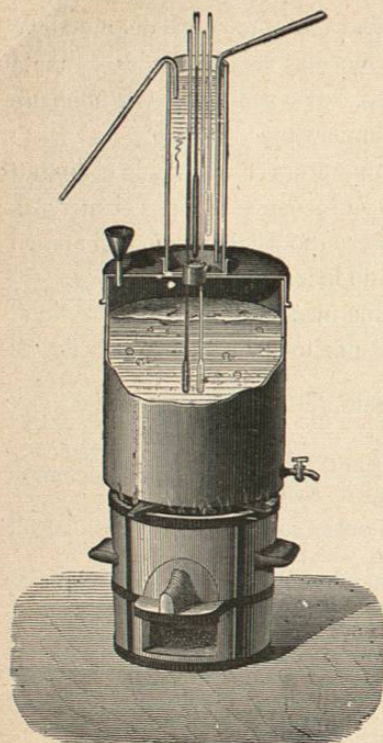


Fig. 549. — Aparato de M. Pierre para medir la dilatación de los líquidos

El tubo termométrico que contiene el líquido penetra en un baño de agua ó de aceite de que está casi lleno un depósito cilíndrico puesto sobre un hornillo. Al lado hay un termómetro de mercurio que marca la temperatura del baño. Las partes exteriores de los tubos están á su vez metidas en un manguito lleno de agua, y un segundo termómetro marca la temperatura de esta agua, para que se puedan hacer las correcciones necesarias á causa de que las envolventes termométricas no están en todos sus puntos sometidas á la temperatura del baño. Con unos agitadores se reparte uniformemente el calor en todas las partes de los depósitos. Antes de empezar las observaciones se ha de tomar una precaución importante: purgar bien de aire el líquido que se ha de estudiar, lo cual se consigue por ebullición ó, si el líquido es demasiado volátil, con la máquina neumática.

El coeficiente de dilatación varía para un mismo líquido con la temperatura, y va creciendo con arreglo á una ley que sólo la experiencia permite formular y que difiere mucho de un líquido á otro.

Thomson ha observado que por lo general los líquidos más dilatables son aquellos cuya temperatura de ebullición es menos elevada. Sin embargo, esta ley no es absoluta. He aquí, según M. I. Pierre, la dilatación de algunos líquidos á 0° y en el punto de ebullición de cada uno de ellos:

SUBSTANCIAS	COEFICIENTE DE DILATACIÓN		
	á 0°	en el punto de ebullición	Temperatura de ebullición
Alcohol.	0,0010486	0,0011955	78°,3
Eter sulfúrico.	0,0015132	0,0016474	35°,5
Sulfuro de carbono.	0,0011398	0,0012493	47°,9
Licor de los holandeses.	0,0011189	0,0012824	84°,9
Bromo.	0,0010382	0,0011677	63°,0
Alcohol metílico.	0,0011856	0,0013297	63°,0
Cloruro de silicio.	0,0012941	0,0015635	59°,0
Cloroformo.	0,0011071	0,0013205	63°,5
Esencia de trementina.	0,0008474	0,0280800	150°,0

Comparando la dilatabilidad de varios líquidos con su compresibilidad, se ha creído reconocer que los que se comprimen más fácilmente son también aquellos que tienen mayor coeficiente de dilatación. Son pocos los líquidos cuya compresibilidad se

ha medido. Poniendo por orden de dilatabilidad (media entre 0° y 100°) algunos de ellos, se tiene la serie siguiente: éter, alcohol, esencia de trementina, cloroformo, agua, mercurio, serie que no difiere de la en que están colocados por orden de compresibilidad sino por el punto ocupado por el cloroformo, que del cuarto pasa al segundo. En los sólidos se observa parecida relación, puesto que los más compresibles suelen ser también los más dilatables.

Por lo demás, se puede comprender la fuerza prodigiosa que el calor ejerce en las moléculas de los cuerpos para separarlos, calculando los esfuerzos que sería preciso ejercer para volver un cuerpo dilatado al volumen que ocupaba antes que el calor modificara este volumen. Por ejemplo, la elevación de temperatura del mercurio de 0° á 30° produce una dilatación total de 0,0053928. Ahora bien, la compresibilidad de este líquido es igual á 0,00000295, es decir que la presión de una atmósfera disminuye su volumen en 295 cienmillonésimas. Así pues, para volver este volumen á 0°, ó más bien para oponerse á la dilatación producida por la elevación de temperatura de 0° á 30°, sería menester ejercer en el líquido la enorme presión de 1828 atmósferas. La contracción ocasionada por el descenso de un solo grado equivale á una presión que varía entre 60 y 66 atmósferas, según que el punto de partida es la temperatura 0° ó la de ebullición del mercurio.

III

DILATACIÓN DEL AGUA. — TEMPERATURA DE SU MÁXIMUM DE DENSIDAD

En el artículo anterior no hemos dicho nada en especial del líquido más común en la Naturaleza, y cuyo modo de obrar nos importa más particularmente conocer cuando se le somete á la acción del calor: en una palabra, del agua. Y es que el agua, por una excepción singular, no se dilata, cuando se la calienta, en todos los grados de la escala termométrica. Cuando se eleva la temperatura á partir de su punto de fusión ó de 0°, empieza por contraerse hasta los 4° próximamente, desde los cuales se va dilatando cada vez más con arreglo á la ley que hemos visto respecto de los otros líquidos.

Los físicos de la Academia del Cimento observaron por primera vez esta anomalía hacia 1670; considerando el nivel del agua contenida en un tubo termométrico y á la que enfriaban, vieron que el nivel del líquido, que al principio había bajado, se puso de nuevo á subir un poco antes de llegar á la congelación. Más adelante Hooke atribuyó este fenómeno á un crecimiento más rápido de la contracción del vidrio, opinión que, adoptada al pronto por varios sabios, fué combatida por Blagden, el cual había observado un máximum de densidad análogo en una mezcla de agua y sal. Como esta mezcla no se congela sino á una temperatura inferior á 0° y el punto del máximum de condensación se halla á igual distancia de la congelación que para el agua pura, el fenómeno pareció verosimilmente independiente del tubo.

El siguiente experimento, discurrido por el físico escocés Hope y que se reproduce aún en las cátedras de física, pone fuera de duda esta independencia y prueba que el fenómeno es efectivamente propio del agua misma. Se mete en un cilindro lleno de hielo la parte superior de una probeta llena de agua á una temperatura que exceda de 4° y que por encima y debajo del cilindro lleve dos termómetros horizontales (figura 550). Los depósitos de estos termómetros indican á cada momento la temperatura de la capa de agua que los rodea. He aquí, pues, lo que ocurre y lo que se comprueba