

se heló en la noche del 17 al 18 de diciembre. Espesor del hielo el 23 de diciembre, 11 centímetros; el 1.º de febrero, 36 centímetros.

Profundidad en metros	Temperatura	
	el 28 diciembre 1879	el 1.º febrero 1880
0	0º,36	0º,35
5	1º,60	1º,90
10	2º,00	2º,00
15	2º,23	2º,45
20	2º,46	2º,50
25	2º,60	2º,50
30	2º,66	2º,40
35	2º,75	2º,55
40	2º,70	2º,70
Promedios	2º,15	2º,15

„2. Lago de Zurich.—Superficie, 87kil,8; profundidad máxima, 141 metros. El lago se heló dos días á fines de diciembre, y luego de nuevo y definitivamente el 21 de enero. Espesor del hielo el 25 de enero, 10 centímetros.

Profundidad	Temperatura	Profundidad	Temperatura	Profundidad	Temperatura
0 ^m	0º,2	50 ^m	3º,6	100 ^m	3º,9
10 ^m	2º,6	60 ^m	3º,7	110 ^m	4º,9
20 ^m	2º,9	70 ^m	3º,7	120 ^m	4º,0
30 ^m	3º,2	80 ^m	3º,8	133 ^m	4º,0
40 ^m	3º,5	90 ^m	3º,8		

„Del estudio de estas cifras deduzco las conclusiones siguientes:

„1.^a La antigua teoría de la congelación de los lagos, que admite un enfriamiento progresivo de toda la masa hasta á 4º C, y luego otro de las capas superficiales que se estratifican de 4º á 0º según su orden de densidad, es exacta.

„2.^a La penetración del frío en las capas superficiales puede bajar hasta 110 metros de profundidad (lago de Zurich).

„3.^a M. Buchanan ha hallado 2º,4 y no 4º en el Loch Lomon á causa de la escasa profundidad de éste.

Otro fenómeno natural cuya explicación se relaciona con el hecho del máximum de densidad del agua á 4º es el de los *pozos de hielo*. Dase este nombre á unas cavidades de forma generalmente cilíndrica que se encuentran, en los Alpes, en la superficie de las masas de hielo que constituyen los glaciares. Examinando el fondo de estos pozos, se ve siempre un cuerpo sólido, como una piedra, un madero, hojas, etc. Véase cómo se explica la formación de una de estas cavidades. La superficie del hielo, expuesta á los rayos solares, se funde uniforme, pero lentamente, cuando la temperatura del aire es inferior á 0º; pero si cae en el hielo un cuerpo extraño, el calor del sol eleva su temperatura y derrite el hielo debajo y alrededor de él con mayor rapidez que en los demás puntos. Fórmase, pues, debajo del cuerpo una cavidad que se llena de agua de fusión. La temperatura de ésta, allí donde está expuesta á la radiación solar, sube poco á poco hasta 4º, y como su densidad aumenta, baja al fondo de la cavidad y la reemplaza el agua más fría y ligera. Por su contacto con el hielo, le cede una parte de su calor, y produce una nueva cantidad de agua de fusión; pero, enfriándose también, se torna más ligera y sube á la superficie. Así pues, una vez formada la cavidad, aumenta progresivamente en profundidad, y el cuerpo extraño que la ha dado nacimiento queda en el fondo, atestiguando con su presencia el origen y la causa del fenómeno.

CAPITULO V

DILATACIÓN DE LOS GASES

I

MEDIDA DEL COEFICIENTE DE DILATACIÓN DE LOS GASES POR EL MÉTODO DE GAY-LUSSAC

Que la dilatación de los gases sea, para una misma elevación de temperatura, mucho mayor que la de los líquidos y con mayor motivo que la de los sólidos, es un hecho conocido de muy antiguo y que explica por qué los primeros termoscopios ideados estaban fundados en la dilatación del aire. En virtud de un fácil experimento se sabía que un globo cerrado y lleno de aire se rompe cuando se eleva demasiado su temperatura, y que una vejiga se infla y revienta en las mismas circunstancias. Las medidas que hemos dado ya de los coeficientes de dilatación de los sólidos y los líquidos nos han hecho ver que el volumen del mercurio, el más dilatado de los segundos, aumenta en 179 diezmilésimas cuando se le calienta de 0º á 100º, al paso que el del metal más dilatado, el zinc, sólo aumenta en 102 diezmilésimas para igual elevación de temperatura. El aire, en iguales condiciones, se dilata 3665 diezmilésimas, más del tercio de su volumen primitivo; casi 36 veces tanto como el zinc, y más de 20 que el mercurio. Esta proporción es poco más ó menos la misma para todos los gases, conforme vamos á verlo al describir los principales procedimientos que han servido á los físicos para determinar sus coeficientes de dilatación. Gay-Lussac, á quien corresponde el honor de haber hecho las primeras determinaciones exactas, halló para todos los gases una cifra mucho mayor que la que hoy se admite.

Antes de la época de este ilustre físico habíanse hecho ya varias tentativas con objeto de medir la dilatación de los gases, entre otras las de Hauksbee y Amontons, Priestley, Monge y Berthollet, Guyton y Prieur; pero las conclusiones de estas indagaciones multiplicadas no concordaban entre sí. Hoy sabemos que la divergencia de los resultados consistía en gran parte en la insuficiencia de los procedimientos de desecación de los gases; la humedad que conservaban en los experimentos, y la formación de vapores por efecto del calor, eran causas de perturbación y de error á la sazón inevitables. Según dice Lamé atinadamente, “no se conocían entonces las leyes de formación de los vapores, y esta circunstancia descuidada impedía que los experimentos fuesen comparables entre sí.” Gay-Lussac en Francia y Dalton en Inglaterra fueron los primeros que lograron descubrir las leyes de dilatación de los gases; y por largo tiempo se consideró que el primero había dado las verdaderas fórmulas y el valor verdadero del coeficiente de dilatación común. He aquí el enunciado de las tres leyes que cada cual dedujo por su parte, y que han sido conocidas largo tiempo en la ciencia con el nombre de leyes de Gay-Lussac:

PRIMERA LEY: *Todos los gases se dilatan uniformemente de 0 á 100 grados.*

SEGUNDA LEY: *La dilatación de los gases es independiente de la presión.*

TERCERA LEY: *La dilatación común de los gases entre 0 y 100 grados es igual á*

las 375 milésimas de su volumen á 0°, ó bien su coeficiente de dilatación es igual por 1 grado á 0,00375, es decir, á $\frac{1}{267}$.

Véase cómo preparaba sus experimentos el ilustre físico. Tomemos por ejemplo el que tenía por objeto la dilatación del aire (fig. 551).

Habiendo arreglado un tubo termométrico provisto de un depósito esférico y de un largo vástago perfectamente calibrado, y dividido en toda su longitud en partes de igual capacidad, calculó, conforme hemos visto al describir el termómetro, la relación exacta de la capacidad de una división con la del depósito. Entonces lo llenó de mercurio, que sometió á la ebullición para purgarlo enteramente de aire y de humedad. En tal estado, ajustó el vástago al extremo de un largo tubo C lleno de cloruro de calcio, é invertido luego verticalmente. Introduciendo un hilo de platino en el vástago é imprimiendo algunas sacudidas, el mercurio salía del tubo, donde lo iba reemplazando el aire que se deslizaba en el espacio comprendido entre el hilo de platino y el mercurio. Se retiraba

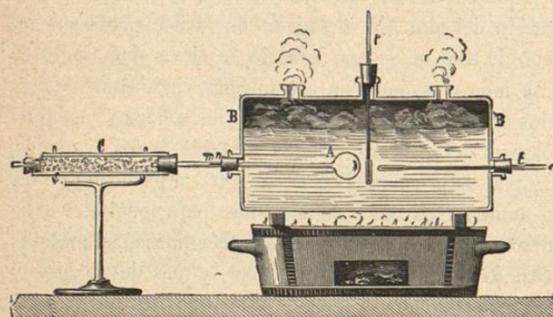


Fig. 551. — Aparato de Gay-Lussac para medir la dilatación de los gases

el hilo cuidando de dejar una gota de mercurio que sirviera de índice, y el depósito quedaba así lleno de aire seco por su paso al través del cloruro de calcio. Preparado el tubo de tal suerte, lo introducía en una cubeta BB, llena de hielo en fusión ó á 0°; se anotaba la posición del índice, y en seguida se ponía la cubeta en un hornillo para elevar su temperatura. Dos termómetros *tt* marcaban ésta, y la marcha del índice, que se veía por fuera, daba la medida de la dilatación para temperaturas más y más elevadas. Gay-Lussac tenía así los volúmenes de una misma masa de aire á 0° y á un número de grados T. Deduciendo de este último volumen la dilatación del vidrio, sacaba en consecuencia la dilatación verdadera del gas para T grados y por consecuencia para 1 grado, es decir, el coeficiente medio de dilatación entre 0 y T. Si la presión barométrica no variaba mientras duraba el experimento, no era menester hacer corrección alguna por este concepto; en caso contrario, había que referir el segundo volumen medido á la presión observada al principio.

Operando así, Gay-Lussac halló una dilatación uniforme entre 0° y 100°, y un coeficiente de dilatación para todos los gases, en estos límites. Davy fué quien reconoció que la dilatación es independiente de la presión.

Dalton había obtenido á corta diferencia el mismo resultado en lo que se refiere al valor del coeficiente de dilatación, que halló igual á 0,00372; pero él lo interpretaba de otro modo, admitiendo que la dilatación seguía una progresión geométrica, en vez de seguir la aritmética, según Gay-Lussac.

Posteriormente á este físico, Dulong y Petit y luego Pouillet hicieron nuevos estudios sobre el mismo asunto. Los dos primeros comprobaron la primera ley de Gay-Lussac, con el aire y el hidrógeno, desde 37° bajo cero hasta 360°. Habiéndola hallado exacta en estos límites respecto de gases tan diferentes como el aire y el hidrógeno, se

el hilo cuidando de dejar una gota de mercurio que sirviera de índice, y el depósito quedaba así lleno de aire seco por su paso al través del cloruro de calcio. Preparado el tubo de tal suerte, lo introducía en una cubeta BB, llena de hielo en fusión ó á 0°; se anotaba la posición del índice, y en seguida se ponía la cubeta en un hornillo para elevar su temperatura. Dos termómetros *tt* marcaban ésta, y la marcha del índice, que

la admitió con mayor motivo para todos los demás. Pero los mismos físicos observaron que para un mismo gas la uniformidad de dilatación, exacta entre — 36° y 100°, no lo es ya á temperaturas mayores, medidas siempre con el termómetro de mercurio. A partir de 100°, las dilataciones tienen valores decrecientes para aumentos iguales de temperatura, lo cual debe interpretarse únicamente en el sentido de que la dilatación más allá de 100° no es la misma para el mercurio que para los gases: un termómetro de mercurio indicaría temperaturas más altas que uno de gas.

II

DILATACIÓN DE LOS GASES. — EXPERIMENTOS DE V. REGNAULT

En tal estado se hallaba la ciencia, con respecto á este asunto, en 1835, época en que el físico sueco Rudberg, profesor de la universidad de Upsal, hizo varias investigaciones que tendieron á probar que las leyes de Gay-Lussac no eran tan exactamente rigurosas como se había creído hasta entonces. Tomando mayores precauciones para secar el aire en el cual operaba, Rudberg dedujo una cifra muy distinta de la que hasta entonces se había admitido para el coeficiente de dilatación: halló 0,00365 en vez de 0,00375.

Pero V. Regnault estudió á su vez los experimentos de Rudberg, y en el detalle de las operaciones notó causas de error que hasta entonces no se habían podido tener en cuenta. Resolvió, pues, emprender de nuevo los estudios de Gay-Lussac, hacerlos extensivos á todos los gases, y discurrió con este objeto procedimientos y aparatos más perfectos, que le dieron los resultados que vamos á indicar brevemente, dando una sucinta idea de los métodos nuevos.

El globo A (fig. 552), destinado á contener el aire ó los gases que se han de estudiar, está colocado en una vasija de latón que se llenará primero de hielo, y luego de agua que con una lámpara de alcohol se puede calentar hasta la temperatura de la ebullición. El angosto

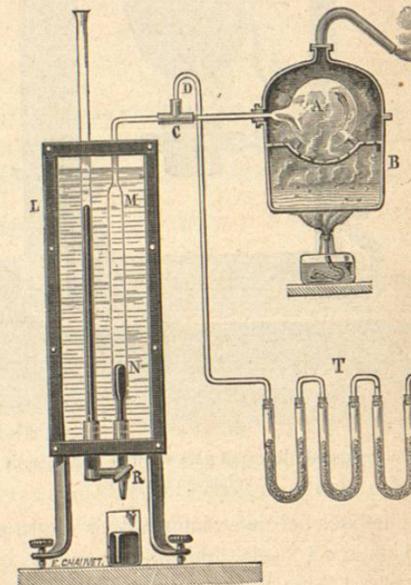


Fig. 552. — Aparato Regnault para medir la dilatación de los gases á presión constante

tubo en que remata el globo se puede poner en comunicación, en C, con un manómetro de aire libre MN, y de otra parte, por un tubo D, con una serie de tubos T que contienen sustancias desecantes, como cloruro de calcio, piedra pómez empapada en ácido sulfúrico, etc. Con una bomba de mano se hace el vacío en el globo al través de los tubos T, y se introduce en él el aire que pierde su humedad por este paso. Repítase la operación cierto número de veces, y en seguida se deja algunos instantes el globo en comunicación con la atmósfera, de modo que la presión del gas interior sea precisamente igual á la atmosférica: entonces se cierra á la lámpara, en D, el tubo de co-

municación. El globo A, lleno de gas perfectamente seco y sin vestigio de humedad en sus paredes, queda sólo en comunicación con el manómetro, cuyos dos brazos tienen el mercurio al mismo nivel.

Se echa mercurio en el brazo abierto del manómetro, ó se le quita del otro brazo por la llave R, hasta que el nivel común toque á un punto de referencia M, con lo cual se tiene un volumen de gas determinado y conocido á 0°, puesto que durante todas estas operaciones la vasija estaba llena de hielo en fusión y á la presión atmosférica conocida por el barómetro.

Terminada esta primera fase del experimento, se procede á la segunda. Quitase el

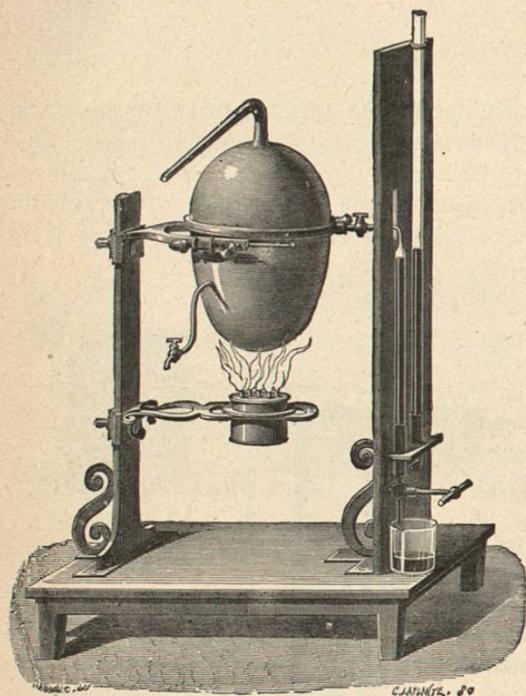


Fig. 553.—Aparato Regnault para medir la dilatación de los gases de volumen constante

hielo de la vasija, y en su lugar se pone agua que se hace hervir. El gas se dilata, repele el mercurio en el brazo M del manómetro hasta un punto N, y entonces se equilibra el nivel en los dos brazos del manómetro dejando salir mercurio por la llave R. De este modo la presión del gas es siempre igual á la exterior, pero su volumen ha variado y se puede medir fácilmente el aumento de volumen en el tubo MN dividido previamente en partes de igual capacidad. Conócese por otra parte la temperatura de esta parte del gas, la cual es la del agua que lo rodea en la caja L. Entonces se puede plantear una ecuación merced á la cual se calcula el coeficiente de dilatación del gas á presión constante y volumen variable.

Valiéndose M. Regnault de otro método, del que vamos á decir cuatro palabras, ha obtenido resultados que no son idénticos á los del primero, aun cuando la diferencia no es mucha. La preparación del gas, así como la determinación de su volumen y de su presión á 0°, se hacían del mismo modo que en el experimento anterior, y la disposición del aparato sólo difería en la del manómetro, cuyos brazos tenían el mismo diámetro y no estaban rodeados de agua. La figura 553 hará comprender sin necesidad de explicación la primera fase de la operación. La segunda fase consiste en calentar la vasija, cuyo hielo ha sido reemplazado con agua, y en hacer que ésta hierva. El gas dilatado rechaza el mercurio del manómetro, cuyo nivel tocaba, á 0°, en un punto de referencia marcado. Echando mercurio por el brazo abierto del manómetro, se lleva á dicho punto de referencia el nivel del mercurio del segundo. Se mide la diferencia de nivel y se agrega la presión exterior, que ha podido cambiar mientras tanto. Así pues, el volumen del gas ha permanecido constante en estas fases del experimento. Se le refiere á lo que sería á 0°

mediante una fórmula muy sencilla en que entra el coeficiente de dilatación buscado, así como el coeficiente de dilatación del vidrio. Y como en la hipótesis de la exactitud de la ley de Mariotte los volúmenes de un mismo gas, á temperatura igual, deben ser inversamente proporcionales á las presiones, se puede plantear una ecuación que permite calcular el coeficiente ó la incógnita del problema.

Según se ve, lo que se hace variar en este segundo método es la presión, al paso que el volumen permanece sensiblemente constante (la diferencia sólo procede de la dilatación del vidrio): es, pues, la dilatación á volumen constante y á presión variable.

He aquí los principales resultados obtenidos por Regnault con uno ú otro método:

COEFICIENTES DE DILATACIÓN DE LOS GASES ENTRE 0° Y 100°

Gases	A volumen constante	A presión constante
Aire.	0,003665	0,003670
Hidrógeno.	0,003667	0,003661
Nitrógeno.	0,003668	"
Óxido de carbono.	0,003667	0,003669
Protóxido de ázoe.	0,003676	0,003719
Ácido carbónico.	0,003688	0,003710
Cianógeno.	0,003829	0,003877
Acido sulfuroso.	0,003845	0,003903

El cuadro anterior demuestra que los coeficientes de dilatación de los gases varían de un gas á otro, según el método empleado para determinarlos. Además, distan de ser iguales para todos los gases. El valor encontrado por Gay-Lussac para el aire, entre 0° y 100°, debe rebajarse bastante. En lugar de ser 0,00375 ó la fracción $\frac{1}{267}$, es

0,003665 ó la fracción $\frac{1}{270}$ Regnault ha comprobado además que el coeficiente no es independiente de la presión ó de la densidad inicial; excepto por lo que hace al hidrógeno, aumenta con la presión. El coeficiente del aire, por ejemplo, aumenta de 0,003648 á 0,003709, cuando la presión crece de 109 milímetros á 3655.

Así pues, las leyes formuladas por Gay-Lussac no son exactas. Conviene, sin embargo, observar que, respecto de los gases que no se había podido aún licuar, y que por esta razón se les llamaba *permanentes*, como el aire, el nitrógeno ó ázoe, el hidrógeno, el óxido de carbono, etc., la diferencia de los coeficientes sólo está en la última cifra, pudiéndose decir que para todos es igual á 0,00367 ó á $\frac{1}{273}$. Así también la

variación con la presión no es bien perceptible sino en los gases licuefiables. Por lo demás, estos resultados concuerdan con lo que se sabe acerca de la inexactitud de la ley de Mariotte. "Es probable, dice M. Jamín, que si todos los gases siguieran la ley de Mariotte, tendrían una dilatación común, igual poco más ó menos á la del hidrógeno é independiente de su presión; pero como observan una ley de compresibilidad más rápida por lo general, que varía con su naturaleza y que decrece cuando su temperatura aumenta, poseen una dilatación desigual, tanto mayor cuanto más compresibles son, y que crece con la presión, por lo cual hay que distinguir dos coeficientes, uno de volumen constante y otro de presión constante. Sin embargo, si esta es la verdad experimental, se ha podido observar que las diferencias entre las distintas dilataciones son

muy escasas., Verdet venía á deducir lo mismo cuando decía: "Es probable que el enrarecimiento y la elevación de temperatura tienden á aproximar un gas cualquiera á un estado gaseoso perfecto, en el que seguiría rigurosamente la ley de Mariotte y en que sus dos coeficientes de dilatación serían iguales é independientes de la presión. También es probable que el valor común de estos dos coeficientes de dilatación sería independiente de la naturaleza de los gases.,

Al presentar Regnault en 1842 los resultados de sus experimentos á la Academia de Ciencias, y al demostrar que no confirmaban las dos leyes fundamentales de la teoría de los gases, tal cual el genio de Gay-Lussac las descubriera, decía: "¿Hay que deducir de esto que en adelante se han de desterrar esas leyes de la ciencia? No soy de esa opinión. Creo que á dichas leyes, lo propio que á cuantas se han reconocido acerca de los gases, la ley de los volúmenes, etc., se las debe considerar como verdaderas hasta cierto límite, es decir, que estarán más á punto de convenir con los resultados de la observación cuanto en mayor estado de dilatación se tomen los gases. Estas leyes se aplican á un estado gaseoso perfecto al cual se acercan más ó menos los gases que nos presenta la Naturaleza, según su naturaleza química, según la temperatura á que se les considere y que puede distar más ó menos de los puntos en que hay cambio de estado, y por último, según su estado de mayor ó menor compresión.,

Lo que el ilustre físico dice acerca de las leyes físicas de los gases, lo hemos hecho notar ya relativamente á otras leyes naturales. Las de Keplero, por ejemplo, no son verdaderas sino en el caso ideal de que los planetas no ejercieran unos sobre otros las acciones perturbadoras que la observación y la teoría han revelado de consuno y que á cada momento modifican la forma y dimensiones de sus órbitas y velocidades respectivas. Esta diferencia entre el enunciado riguroso de dichas leyes y los fenómenos realmente observados no mengua la importancia del descubrimiento ni el mérito del gran hombre que supo hacerlo.

III

TERMÓMETRO Y PIRÓMETRO DE AIRE. — EL CERO ABSOLUTO DE TEMPERATURA

Hemos visto ya cuáles son las ventajas y cuáles los inconvenientes del termómetro de mercurio. La comodidad de su empleo y la facilidad de su construcción le hacen precioso para la mayor parte de las observaciones ordinarias; pero adolece del grave defecto de que sus indicaciones no siempre son comparables entre sí á causa de las desviaciones de los puntos fijos; dos termómetros de mercurio tampoco son siempre comparables, en razón de las variaciones de la dilatación del vidrio, que no son las mismas de una envoltura á otra. Ahora bien, la magnitud del coeficiente de dilatación de un gas comparada con la de los coeficientes de dilatación de los líquidos y de los sólidos, hace que las influencias de que hablamos no produzcan en los cambios de volumen de este gas más que errores despreciables.

Y tomando sobre todo, para construir termómetros fundados en la dilatación de los gases, un gas permanente, por ejemplo el aire seco, se tiene la seguridad de que su dilatación permanecerá constante entre los límites de temperatura observables. Por este concepto sería preferible al aire el hidrógeno cuyo coeficiente no varía con la presión si no fuese de uso muy incómodo; pero, según los experimentos de Regnault, un termómetro de aire y otro de hidrógeno subsisten perfectamente de acuerdo de 0° á 350°.

Todo aparato que sirve para medir la dilatación de los gases puede emplearse como termómetro de aire. Tales son los que hemos descrito en el artículo anterior y que representan las figuras 552 y 553. En efecto, procediendo en cada operación del mismo modo que si se tratara de determinar el coeficiente del aire, se deduce una relación entre este coeficiente, la presión y la temperatura. Esta relación permite calcular una de dichas cantidades por medio de las otras dos, cuando son conocidas. Se puede, pues, tomar por incógnita la temperatura, puesto que el coeficiente del aire está calculado para siempre y la presión ó el volumen del gas se obtienen por el mismo experimento.

De aquí resulta que se pueden emplear dos clases de termómetros de aire según que se determinen las variaciones del volumen del gas á presión constante ó las de la presión á volumen constante. Regnault da la preferencia á este segundo método, porque en el primero la masa de aire sometido á la acción del calor disminuye á medida que sube la temperatura; de donde se sigue que refiriendo su volumen á la temperatura del tubo en que se observan las dilataciones, este volumen se calcula con una exactitud decreciente. El aparato basado en la observación de las variaciones de presión no está sujeto á este inconveniente.

También se puede emplear como termómetro de aire el aparato representado en la figura 554. El depósito B tiene una forma cilíndrica

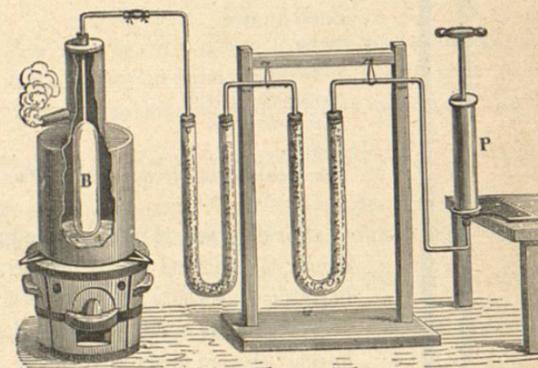


Fig. 554. — Medida de una temperatura con el termómetro de aire

prolongada, porque es más favorable que la esférica para el pronto establecimiento del equilibrio de temperatura entre el aire interior y el medio cuya temperatura se desea conocer. Supongamos que se trata del vapor de un líquido en ebullición. Se coloca el depósito en este medio y se le llena de aire seco con los procedimientos y las precauciones que hemos indicado ya. Cuando ha adquirido la temperatura del vapor, se cierra el tubo á la lámpara, observando en este momento la presión del barómetro. Trasládase entonces el depósito á una cubeta de mercurio y se mete el tubo verticalmente en el líquido.

Se rodea de hielo el depósito hasta su extremidad superior, y cuando se le supone á 0°, se rompe la punta del tubo debajo del mercurio. Disminuyendo la presión del aire enfriado del depósito, el mercurio sube por el tubo y á la parte cilíndrica; entonces se mide con el catetómetro la diferencia de nivel del líquido en la cubeta y en el depósito, y la diferencia de esta altura y de la del barómetro da la presión del aire á 0°; deduciéndose ya fácilmente el volumen actual de este aire del peso del mercurio que ha penetrado en el aparato. De este modo se tienen todos los elementos que entran en la fórmula, y el cálculo da la temperatura buscada.

La medida de las temperaturas elevadas con el termómetro de aire exige que el depósito que contiene el gas sea infusible á dichas temperaturas. El vidrio, pues, no puede servir tan luego como se le pone próximo á la temperatura en que empieza á reblandecerse.