

CAPITULO VIII

CAMBIO DE ESTADO DE LOS CUERPOS.—EBULLICIÓN Y VAPORIZACIÓN DE LOS LÍQUIDOS

I

SUBLIMACIÓN Y EVAPORACIÓN

La mayor parte de los cuerpos sólidos deben fundirse ó licuarse para pasar al estado de gas ó de vapor; sin embargo, el alcanfor, el yodo, el arsénico y algunas otras substancias disminuyen de peso al aire libre, sin pasar por el estado líquido; este paso directo de un cuerpo sólido al estado gaseoso se conoce con el nombre de *sublimación*. Al contrario, el vapor de los cuerpos en cuestión, convenientemente enfriado, puede solidificarse sin pasar por el estado líquido, propiedad que se utiliza para obtener cristales más ó menos voluminosos. La nieve y el hielo desprenden también vapores sin derretirse previamente; todo el mundo ha podido observar este hecho en tiempo seco y de fuertes heladas, viéndose fragmentos de hielo ó montones de nieve que disminuyen ostensiblemente de volumen y hasta desaparecen, sin que haya habido ninguna fusión parcial.



Fig. 572. — Fenómeno de la ebullición

Por lo que respecta á los líquidos, la mayor parte de ellos se reducen espontáneamente á vapor á temperaturas muy diferentes. El agua de que se llena una vasija destapada desaparece poco á poco; los objetos mojados se secan con tanta mayor rapidez cuanto menos húmedo es el aire ambiente y más elevada la temperatura; si se los pone en una corriente de aire, el agua de que están empapados se reduce todavía más pronto á vapor. El mercurio se evapora á las temperaturas ordinarias, como así lo ha demostrado Faraday con el siguiente experimento: suspendió una hoja de oro en un frasco que contenía mercurio, y al cabo de algún tiempo la encontró blanca: el mercurio se había combinado con el oro, lo cual no podía suceder sino á causa de la evaporación del primero. Pero hay otros líquidos, como el ácido sulfúrico y los aceites grasos, que no gozan de esta propiedad. Bellani mantuvo dos años una placa de cinc bien limpia suspendida en un frasco que contenía ácido sulfúrico concentrado, y al cabo de dicho tiempo sacó el metal que no había perdido nada de su brillo.

Este primer modo de pasar los líquidos al estado gaseiforme es lo que se llama *evaporación*, caracterizándolo el hecho de que, para un mismo líquido, ocurre á cualquier temperatura y se efectúa únicamente en las capas superficiales. Por el contrario, la *vaporización* es la reducción á vapor por efecto de una elevación de temperatura en el momento de llegar ésta á un límite fijo, determinada para cada líquido, y

constante para una misma presión exterior. El líquido entra entonces en *ebullición*, es decir, que las burbujas de vapor que se escapan de las paredes de la vasija que lo contiene agitan su masa, elevándose á la superficie á causa de su ligereza específica.

Vamos á estudiar sucesivamente estos varios modos de pasar los cuerpos sólidos ó líquidos al estado gaseoso.

Únicamente diremos algunas palabras acerca de la sublimación ó volatilización, es decir, sobre la transformación inmediata de los sólidos en vapores; en el capítulo siguiente entraremos en algunos detalles sobre el fenómeno inverso que se ha utilizado para obtener cristales de ciertos cuerpos. Recordaremos ahora solamente que merced al calor de la chispa eléctrica y sobre todo al del arco voltaico producido por las pilas más enérgicas, se ha podido volatilizar los metales, el platino, el oro, y los cuerpos más refractarios, como el carbón, la cal, la magnesia y el óxido de cinc.

Lo que caracteriza á la evaporación, es decir, á la formación espontánea de vapores en la superficie de un líquido, es que tiene lugar generalmente á cualquier temperatura, siquiera sea más abundante cuanto más elevada ésta. Así sucede hasta que esta temperatura llega á un punto, fijo para cada líquido, cuando la presión exterior continúa siendo la misma; entonces ocurre el fenómeno de la ebullición y la vaporización que lo acompaña. La evaporación va siempre seguida de un descenso de temperatura, debido á la absorción de la cantidad de calor necesaria para que pase el líquido al estado gaseoso. En el acto de la vaporización, el calor que requiere esta transformación se saca del foco.

Veamos ahora cuáles son las leyes por que se rige la formación de los vapores.

II

LEYES DE LA FORMACIÓN DE LOS VAPORES EN EL VACÍO

El físico inglés Dalton fué el primero que estudió prácticamente las leyes de la formación de vapores en el vacío. He aquí cuáles son éstas y cómo se las comprueba.

Si se introduce en el vacío barométrico cierto volumen de un líquido cualquiera, verbigracia un centímetro cúbico de alcohol, en seguida se deprime el nivel del mercurio y se detiene en un punto *b* cuya distancia al nivel *a* de un barómetro, metido en la misma cubeta que el primer tubo (fig. 573), marca la tensión ó la fuerza elástica del vapor formado. Por aquí vemos ya que los líquidos se reducen espontáneamente á vapor en el vacío.

Supongamos que haya sobrenadado en el mercurio una pequeña capa de líquido. Si se levanta entonces el tubo sin sacar de la cubeta su parte inferior, se ve que el nivel continúa en *b* á la misma altura que antes; pero la capa líquida de alcohol disminuye de espesor á medida que aumenta el espacio ocupado por el vapor. Se ha formado, pues, una nueva cantidad de éste, sin que su tensión haya cambiado, y así sigue hasta que se haya evaporado todo el líquido. Si en este caso se continúa levantando el tubo, lo cual aumenta naturalmente el espacio que puede ocupar el vapor, el nivel del mercurio subirá, lo que prueba que la tensión del vapor disminuye. Si se baja de nuevo el tubo, el nivel baja y vuelve al punto *b*; pero si entonces se prosigue el mismo movimiento, el nivel permanece constante al mismo tiempo que una porción creciente del vapor pasa otra vez al estado líquido.

La figura 573 muestra cómo se dispone el aparato necesario para hacer este expe-

rimento. En una cubeta de fondo prolongado de modo que se pueda meter profundamente un tubo, se introducen dos tubos barométricos, uno de ellos fijo y destinado únicamente á marcar el valor de la presión atmosférica mientras dura el experimento. El segundo tubo está colocado en el eje de la prolongación de la cubeta. Antes de introducir el líquido (agua, alcohol, éter, etc.), los niveles del mercurio están á la misma altura en los dos tubos. Con una pipeta curva, se introduce el líquido que se ha de vaporizar, por la abertura inferior del tubo central, bajo el mercurio, y gracias á su

ligereza específica el líquido se eleva hasta la cámara barométrica, en la cual se observan los fenómenos que acabamos de describir. Si desde el principio sólo se han dejado penetrar algunas gotas de líquido, desaparecen instantáneamente al llegar á la cámara barométrica; introduciendo nuevas gotas, se ve que la depresión del mercurio va aumentando hasta que el líquido aparece á la superficie de aquél, desde cuyo momento cesa la depresión, indicando que la fuerza elástica del vapor ha llegado á su máximo. Este máximo es invariable cualquiera que sea la magnitud del espacio vacío en que se ha efectuado la vaporización, mientras el líquido permanece en contacto con su vapor y no cambia la temperatura. Entonces se dice que el espacio en cuestión está saturado. A veces se hace patente esta invariabilidad de la tensión máxima poniendo tres tubos barométricos sobre una cubeta de mercurio, puesto que todos indican la perfecta igualdad del nivel.

De estos primeros experimentos resulta: 1.º, que un líquido puesto en un espacio vacío se vaporiza en él espontáneamente; 2.º, que el vapor así formado llega á un grado de tensión máxima é invariable mientras subsiste en presencia de un excedente de líquido, con tal que la temperatura sea también invariable; 3.º, si el espacio no está saturado, es decir, si el vapor no está en presencia de su líquido, haciendo variar el espacio que ocupa, varía su tensión, y la ley de compresibilidad es sensiblemente la misma que rige á los gases, ó sea la de Mariotte.

La tensión máxima depende á la vez de la naturaleza del líquido y de la temperatura.

Veamos cómo se comprueba experimentalmente esta doble dependencia.

Para demostrar que la tensión máxima depende de la especie de líquido que se reduce á vapor, se hace uso del aparato representado en la figura 574 y que se conoce con el nombre de *haz barométrico*. Es un conjunto de cierto número de tubos barométricos, en los cuales se introducen distintos líquidos, como agua, alcohol, éter, esencia de trementina, etc., en cantidad suficiente para que, á la temperatura exterior común, que de saturado el espacio de cada cámara. Obsérvase entonces la diferencia de nivel del mercurio en los tubos de líquido, y se pueden medir las diferentes tensiones por

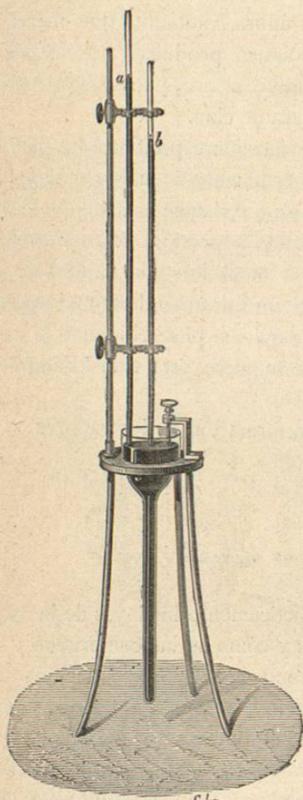


Fig. 573. — Evaporación espontánea de un líquido en el vacío barométrico. Primera ley de Dalton.

comparación con la altura del mercurio en el barómetro formado por el tubo de la derecha.

Vamos á ver ahora que la tensión máxima del vapor va aumentando con la temperatura, según el líquido. Para demostrar esta ley, se valió Dalton de un aparato parecido al de la figura 573, pero cuyos dos tubos estaban metidos en un cilindro de vidrio lleno de agua que descansaba en la cubeta de mercurio (fig. 575). Calentábase el agua por intermedio del mercurio, y á medida que se elevaba su temperatura, indicada por un termómetro sumergido en el baño, veíase bajar el nivel del mercurio en el

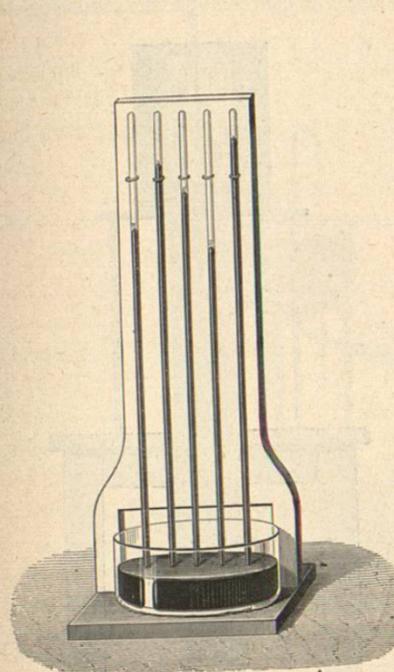


Fig. 574. — Desigualdad de las tensiones máximas de varios vapores á la misma temperatura

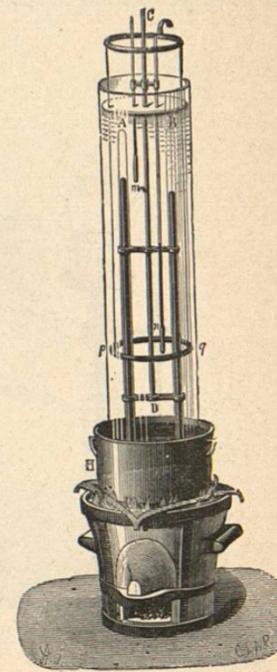


Fig. 575. — Aparato de Dalton para determinar la tensión de los vapores sobre 0°

tubo cuya cámara contenía el vapor sometido al experimento. Podíase comprobar así la ley en tanto que el nivel no bajaba hasta el del mercurio en la cubeta misma, es decir, mientras la tensión del vapor no llegaba á la presión atmosférica. Más allá de ésta, Dalton empleaba un tubo encorvado análogo al que sirve para la ley de Mariotte; la porción cerrada, ó sea la más corta del tubo, contenía el líquido vaporizable y estaba metida en un baño cuya temperatura se elevaba gradualmente. El nivel del mercurio en el brazo abierto iba subiendo, y la tensión del vapor podía medirse á cada instante agregando la altura barométrica á la distancia vertical de los niveles del mercurio en los dos tubos.

El aparato que acabamos de describir, representado en la figura 575, le sirvió á Dalton para medir la tensión máxima de los vapores sobre cero. Aparte de la importancia científica de esta tensión, es indispensable tener conocimiento exacto de ella á varias temperaturas para los casos en que se emplea el vapor de agua como fuerza motriz; razón por la cual la han estudiado detenidamente los físicos, y más

especialmente Dalton, Gay-Lussac, Dulong, Arago y por fin el malogrado Regnault que dedicó á esta cuestión capital sus maravillosas facultades de precisión en las medidas y de ingeniosa sagacidad en la elección de los métodos y en la disposición de los aparatos.

Indiquemos sucintamente estos métodos.

Regnault procedía de tres distintos modos según que la temperatura del vapor

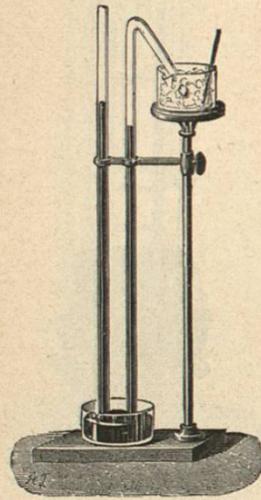


Fig. 576.—Medida de la tensión máximum de un vapor á una temperatura inferior á 0°

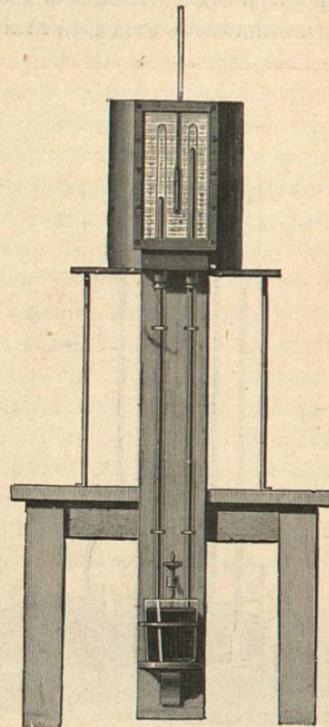


Fig. 577.—Aparato de Regnault para medir la tensión de los vapores de 0° á 60°

cuya fuerza elástica quería medir era inferior á 0°, ó comprendida entre 0° y 60°, ó por fin superior á 60°.

En el primer caso, seguía constantemente el método empleado antes que él por Gay-Lussac, valiéndose del aparato reproducido en la figura 576. También se compone éste de dos tubos barométricos metidos en la misma cubeta, pero la cámara barométrica del que ha de recibir el líquido que se ha de vaporizar es más larga que la del otro y encorvada de modo que se pueda introducir aisladamente en una vasija llena de una mezcla frigorífica. Un termómetro cuyo depósito está sumergido en esta mezcla marca la temperatura.

A decir verdad, por este procedimiento tan sólo una parte del espacio ocupado por el vapor se pone á la misma temperatura de la mezcla frigorífica, y podría recelarse que la parte que se halla fuera influyera en la tensión máximum buscada y aumentara su valor. Pero no sucede así, y no hay ninguna corrección que hacer por este concepto. En efecto, según un principio tan importante para la teoría de los vapores

como lo ha sido para la práctica industrial (ha conducido al ilustre Watt á la invención del condensador de las máquinas de vapor), tan luego como un vapor llena un espacio cuyas paredes están á temperaturas diferentes, su tensión máximum (en presencia de un exceso de líquido) no excede jamás de la que corresponde á la temperatura más baja. Esto es lo que se llama el principio de las *paredes frias*. Examinando lo que ocurre en el caso particular del experimento que describimos, se comprenderá fácilmente este principio. Al llegar el líquido á la cámara barométrica se vaporiza en parte; el vapor invade la porción encorvada del tubo, y como su tensión corresponde á la temperatura del líquido, más alta que la de esta mezcla, se condensa en la pared

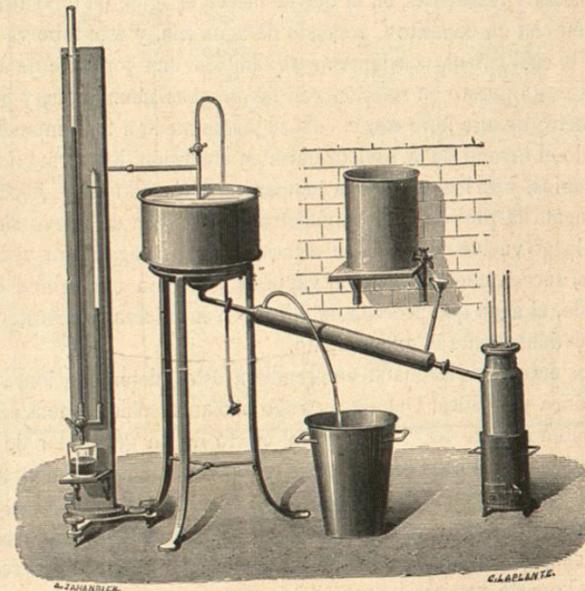


Fig. 578.—Aparato Regnault para medir la tensión de los vapores á temperaturas que pasen de 60°

fria; para reemplazarla se forma una nueva porción de vapor, y así sucesivamente hasta que por esta destilación el líquido pasa enteramente á la parte encorvada del tubo. El vapor que subsiste entonces tiene por tensión máximum la que corresponde á la baja temperatura de la mezcla, etc. La diferencia de nivel del mercurio en ambos tubos indica esta tensión, como en los experimentos de Dalton.

El procedimiento empleado por Regnault para las temperaturas comprendidas entre 0° y 60° próximamente es el de Dalton, pero modificado con el objeto de evitar las causas de error á que este último exponía. En el aparato de la figura 577, la caja que contiene el agua calentada por una lámpara de alcohol puesta debajo de ella es poco alta; sólo rodea la parte superior de los tubos, de suerte que con un agitador es fácil obtener una temperatura uniforme en todas las partes del baño. Un cristal entallado en las paredes de la caja permite que se observe la altura del mercurio en los tubos, la cual medía Regnault con un catetómetro. Las dimensiones reducidas de la caja limitan naturalmente este procedimiento á la medición de las tensiones comprendidas entre 0° y 50° ó 60°.

Para medir la fuerza elástica del vapor de agua á temperaturas superiores á 60°

y 100°, se han modificado completamente el método y los aparatos. El principio adoptado por Regnault está deducido de la conocida ley de la ebullición. Según esta ley, la tensión del vapor de un líquido en ebullición es siempre precisamente igual á la presión exterior que el líquido soporta en tal momento. Así pues, si se mantiene el líquido en un espacio cerrado y con una bomba de compresión ó una máquina neumática, se aumenta ó disminuye progresivamente la presión ejercida en la superficie del líquido, y si al propio tiempo se eleva su temperatura hasta que entre en ebullición, la presión indicada por un manómetro será el valor buscado de la tensión á esta misma temperatura. La figura 578 presenta la disposición de los aparatos. A es una caldera de cobre, de paredes gruesas y resistentes, en la que se hierva el agua: un tubo inclinado la pone en comunicación con un depósito C rodeado de agua fría, y este tubo va metido en un cilindro B por el cual circula constantemente también una corriente de agua fría de *a* á *b*. El depósito está puesto en relación con las bombas neumáticas, y por otra parte con un manómetro de aire libre con el cual se puede medir á todo momento la presión interior. Cuando el líquido de la caldera entra en ebullición, los termómetros *t* permanecen estacionarios, y se lee en ellos la temperatura. Cuando se ha hecho una observación, se aumenta la presión, los termómetros emprenden de nuevo su movimiento ascendente, y luego vuelven á quedarse estacionarios al llegar otra vez al punto de ebullición, y así sucesivamente. Como el vapor se condensa en seguida que sube por el tubo inclinado, el agua que procede de él cae en la caldera, y de este modo puede prolongarse indefinidamente el experimento.

Quince años antes que Regnault emprendiera estas determinaciones de tan gran importancia teórica y práctica, Dulong y Arago habían medido las tensiones del vapor de agua saturado á más de 100°. Valíanse al efecto de un generador de vapor, cuya temperatura se medía con unos termómetros que penetraban en el interior, protegidos por cañones de escopeta llenos de mercurio, uno en el vapor y otro en el agua de la caldera. Por un tubo que tenía una parte vertical y la otra inclinada oblicuamente, comunicaba la caldera con un depósito de palastro lleno en parte de mercurio. Encima de éste y hasta la parte vertical del tubo había agua que se mantenía á una temperatura constante haciendo circular alrededor del tubo una corriente de agua fría. El depósito comunicaba á su vez por un lado con un manómetro de aire comprimido rodeado de agua fría, y por otro con un tubo lateral de cristal que permitía observar exteriormente el nivel del mercurio. Es evidente que á una temperatura dada, indicada por los termómetros, la tensión del vapor equilibraba la fuerza elástica del aire comprimido en el manómetro, agregando la diferencia de nivel del mercurio en el manómetro y en el depósito y deduciendo la presión de una columna de agua cuya altura es fácil de medir.

Dulong y Arago hicieron así experimentos hasta la temperatura de 224°, á la cual la fuerza elástica del vapor de agua era de 24 atmósferas.

Los de Regnault dieron, con una exactitud superior debida al perfeccionamiento de las medidas y á la seguridad de su método, la tensión del vapor desde -30° hasta + 230°, comprendiendo así 260° de la escala termométrica. Sus numerosos experimentos le permitieron construir una curva en que cada punto tiene por ordenada la presión del vapor en milímetros y por abscisa la temperatura. Representase también el valor de estas tensiones mediante una fórmula indicada por M. E. Roche, cuya exactitud ha comprobado Regnault en una gran extensión de la escala termométrica y que tiene el mérito de ser aplicable á las tensiones de los vapores de alcohol y de éter.

Aquí nos limitaremos á presentar el cuadro siguiente, dando de 10 en 10 grados, y con arreglo á los datos de Regnault, la tensión del vapor de agua saturado en milímetros y en atmósferas:

TENSIONES DEL VAPOR DE AGUA SATURADO

TEMPERATURAS	TENSIONES		TEMPERATURAS	TENSIONES	
	en milímetros	en atmósferas		en milímetros	en atmósferas
	milim.	atm.		milim.	atm.
- 30°	0,386	0,0005	+ 110°	1075,37	1,415
- 20°	0,927	0,0012	120°	1491,28	1,962
- 10°	2,093	0,0027	130°	2030,28	2,671
0°	4,60	0,006	140°	2717,63	3,576
+ 10°	9,16	0,012	150°	3581,23	4,712
20°	17,39	0,023	160°	4651,62	6,120
30°	31,55	0,042	170°	5961,66	7,844
40°	54,91	0,072	180°	7546,39	9,929
50°	91,98	0,121	190°	9442,70	12,425
60°	148,79	0,196	200°	11688,96	15,380
70°	233,09	0,306	210°	14324,80	18,848
80°	354,64	0,466	220°	17390,36	22,882
90°	525,45	0,691	230°	20926,40	27,535
100°	760,00	1,000			

Acabamos de ver que Regnault limitó sus experimentos hacia los 230°, lo cual se explica si se considera que á los 232° la fuerza elástica del vapor, igual á 30 atmósferas, comprimía la caldera con tal empuje que se rompió un perno de la armadura que reforzaba sus paredes. Tuvo, pues, que detenerse, medida de prudencia muy justificada, porque á la presión de 30 atmósferas cada decímetro de la superficie interna de la caldera soportaba una carga de 3,100 kilogramos.

Examinando el cuadro precedente se ve que el aumento de presión varía en proporción mucho más rápida que el de temperatura. De 1 atmósfera, que es la presión del vapor á 100°, pasa ésta á 2 atmósferas á los 121°, á 4 á los 145°, es doble á los 172°, llegando entonces á 8 atmósferas, y por último hacia los 202° equivale á 16. El cálculo enseña que á 266° la tensión máxima del vapor de agua saturado llegaría á la enorme potencia de 50 atmósferas.

Todo cuanto acabamos de decir se refiere exclusivamente al vapor de agua. Se han medido también las tensiones de los vapores saturados de otros muchos líquidos, habiéndolas determinado Regnault como las del vapor de agua. A continuación damos los resultados obtenidos con respecto á ciertos vapores empleados ya, ó que podrán serlo en lo sucesivo, como fuerzas motrices en las máquinas. El cuadro que los contiene demuestra cuánto distan los vapores saturados de líquidos diferentes de tener la misma tensión máxima á igualdad de temperatura. Pero cuando ésta es la de la ebullición al aire libre, dicha tensión es necesariamente la misma para todos é igual á una atmósfera.

Dalton ha deducido una ley que, si fuese rigurosa, permitiría averiguar las tensiones de cualquier vapor á una temperatura dada cuando se conociera la del vapor de agua á esta misma temperatura. Dicho físico formulaba en los términos siguientes la