

ley de que hablamos: *Todos los vapores tienen la misma tensión á una temperatura igualmente distante del punto de ebullición de cada líquido.* Esto no es enteramente exacto, según lo ha demostrado Despretz y reconocido el mismo Dalton; pero las diferencias entre el cálculo, basado en la ley en cuestión, y los resultados de la experiencia son casi insignificantes cuando las temperaturas distan poco de la ebullición.

## TENSIONES DE LOS VAPORES SATURADOS DE VARIOS LÍQUIDOS

EN MILÍMETROS DE MERCURIO

TEMPERATURAS	ÉTER	ALCOHOL	ACETONA	CLOROFORMO	CLORURO DE CARBONO	SULFURO DE CARBONO
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
0°	184,39	12,70	63,33	59,72	32,95	127,91
20°	432,78	44,46	180,08	160,47	90,99	298,03
40°	907,04	133,69	419,35	369,26	214,81	617,53
60°	1725,01	350,21	860,96	755,44	447,43	1164,51
80°	3022,79	812,91	1611,05	1407,64	843,29	2032,53
100°	4953,30	1697,55	2796,20	2428,54	1467,09	3325,15
120°	7719,20	3231,73	4552,95	3925,74	2393,67	5148,79
140°	"	5674,59	7007,64	6000,16	3709,04	7603,96
160°	"	"	"	8734,20	5513,14	"

## III

FORMACIÓN DE LOS VAPORES EN EL AGUA Y EN LOS GASES. — LEY DE LA MEZCLA DE GASES Y VAPORES

Nadie ignora que el agua y todos los líquidos evaporables emiten vapores, ora al aire libre en un espacio ilimitado, ora en un recinto cerrado y lleno de aire. En el siglo pasado, y antes de los experimentos de Dalton, hasta se creía necesario el aire para producir la evaporación, considerándole como disolvente del líquido. En realidad, cuando un líquido se halla en un espacio que contenga aire ó cualquier otro gas en lugar de estar en el vacío, la evaporación, más lenta en el primer caso que en el segundo, se efectúa siguiendo las mismas leyes. Si el espacio es ilimitado y el aire está en él en reposo, el vapor se formará rápidamente al principio, y luego más poco á poco, porque las capas que están en contacto con el líquido se aproximarán cada vez más á la saturación, es decir, al momento en que cesará la evaporación. Si el aire ó gas que se halla por cima del líquido se renueva, será más rápida la formación del vapor, porque aquél lo arrastrará consigo á medida que se vaya formando. Diariamente presenciamos ejemplos de estos fenómenos que, según veremos más adelante, tan importante papel desempeñan en la meteorología atmosférica. El viento seca muy pronto el suelo mojado por la lluvia, cuando el aire dista mucho de su punto de saturación. Las lavanderas y amas de casa saben perfectamente que la ropa blanca tendida al aire libre se seca mucho más pronto cuando sopla una brisa algo fuerte, si la dirección de ésta es la de los vientos secos de la región, es decir, si el aire no está previamente saturado de vapor.

*En un espacio limitado y lleno de gas, la tensión máxima del vapor saturado de un líquido cualquiera es precisamente igual á la del mismo vapor en el vacío.*

Esta ley, descubierta por Dalton, se comprueba prácticamente con un aparato análogo á los que ya hemos descrito. La disposición especial relativa á la mezcla del gas y del vapor es obra de Gay-Lussac y está representada en la figura 579. Consiste en un manómetro de aire libre compuesto de dos tubos, uno de los cuales, de mayor diámetro que el otro, tiene en su parte superior una armadura de llave *r* y en la inferior otra llave *r'* que sirve para dar salida al mercurio. Se le llena de este líquido bien seco y en seguida se atornilla á la armadura superior una redoma boca abajo llena del gas también seco y provista asimismo de una llave ó espita.

Ábrense entonces las tres llaves; el mercurio sale por la de abajo, y cierta cantidad de gas pasa de la redoma al tubo mayor. Cuando esta cantidad parece suficiente, se cierran las comunicaciones y se echa mercurio en el tubo menor abierto hasta que, según se ve en la figura 579, esté al mismo nivel en los dos brazos del aparato; en este momento la presión del gas es precisamente igual á la exterior ó atmosférica. Terminada esta primera parte de la operación, se quita la redoma y en su lugar se pone un pequeño embudo cuya llave tiene únicamente una ligera cavidad en su superficie. Llénase el embudo del líquido que se ha de vaporizar y la cavidad vuelta hacia su fondo se llena también; se da media vuelta á la llave, y presentándose entonces la cavidad enfrente del tubo, deja caer en el espacio ocupado por el gas una gota del líquido. Repitiendo esta maniobra muchas veces, se acaba por saturar el espacio del vapor formado, lo cual se conoce cuando el mercurio no baja ya en el tubo, aun en presencia de un exceso de líquido. El volumen del gas aumenta así, pero se le vuelve á su estado anterior introduciendo mercurio en el brazo abierto del manómetro hasta que el nivel recobre en el tubo mayor la altura que tenía antes de introducir el líquido. Es evidente que la elevación de nivel del mercurio del brazo abierto marca entonces precisamente la tensión del vapor saturado del líquido en el espacio de volumen invariable ocupado por el gas. Luego el experimento demuestra que esta tensión es igual á la del vapor en el vacío á la misma temperatura. Sin embargo, esta ley no es rigurosamente exacta, y los experimentos de Regnault, hechos con suma precisión, han demostrado que la tensión de los vapores es siempre algo más débil en los gases que en el vacío. Por ejemplo, la tensión del vapor de agua saturado, á 15° de temperatura, es 12<sup>mm</sup>,70 en el vacío, y sólo 12<sup>mm</sup>,38 al aire; á 38°, es 49<sup>mm</sup>,30 en el vacío y 48<sup>mm</sup>,70 al aire; á 40°, es 54<sup>mm</sup>,4 en el vacío y sólo 53<sup>mm</sup>,7 en el ázoe. Sin embargo, se desprecian tan insignificantes diferencias.

La ley de la mezcla de los gases y vapores, tal como acabamos de exponerla, no solamente es verdadera con respecto á un solo vapor; lo es también con respecto á otros muchos que proceden de líquidos de diferentes clases, pero con la condición de que no ejerzan acción química unos sobre otros. En una palabra, los gases y los vapores mezclados en un mismo espacio tienen una tensión total que es igual á la suma de las que adquiriría en él cada uno de por sí.

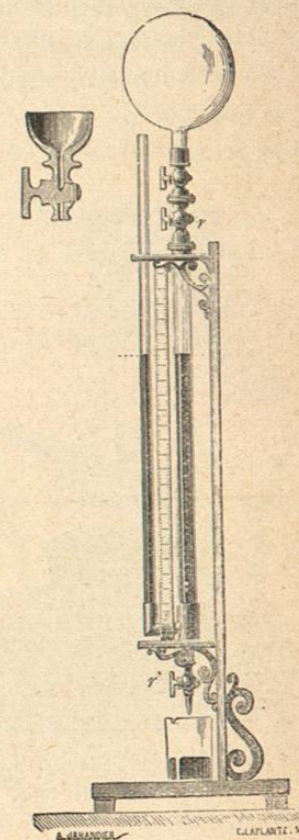


Fig. 579. — Aparato de Gay-Lussac para comprobar la ley de la mezcla de gases y vapores

## IV

## EBULLICIÓN DE LOS LÍQUIDOS. — VAPORIZACIÓN

De todo cuanto precede resulta que el agua, como todos los líquidos, se reduce espontáneamente á vapor á cualquiera temperatura, y que la tensión del vapor saturado, ya en el vacío, ó bien en un recinto cerrado que contenga otro gas, va creciendo al par de la temperatura, en una intensidad y una proporción que varían según los líquidos.

A las temperaturas ordinarias, la transformación del agua en vapor por *evaporación* sólo se verifica en la superficie; ninguna burbuja gaseosa se desprende de la masa interna; únicamente se reconoce que el fenómeno es tanto más rápido cuanto más dilatada relativamente la superficie líquida y más elevada la temperatura. Pero hay que añadir que esta rapidez depende además, así del estado higrométrico del aire ambiente, como de la presión atmosférica mientras dura el experimento. Veamos ahora lo que ocurre cuando, á causa de la elevación creciente de la temperatura, se llega al fenómeno conocido con el nombre de *ebullición*. Tomemos el agua por ejemplo.

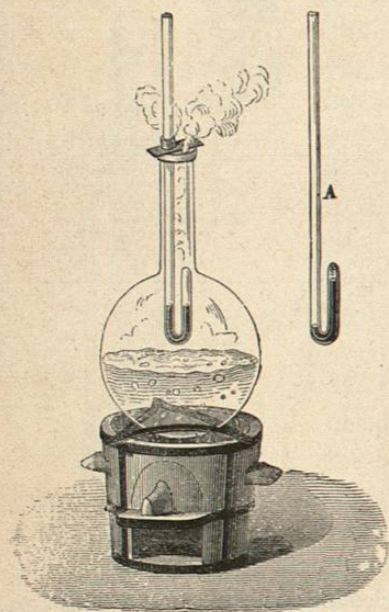


Fig. 580. — Igualdad de la presión exterior y de la tensión del vapor

Pongamos al fuego una vasija con agua y calentémosla progresivamente. Si la lumbre es bastante activa, en breve se verá cómo se forma el vapor, no tan sólo en la superficie del agua, sino también en el seno mismo del líquido. En el fondo y en las paredes inferiores de la vasija, que son las que están en contacto inmediato con las brasas, aparecen burbujas gaseosas, que se desprenden y suben en forma de conos hasta las capas superiores del agua. Estas primeras burbujas de vapor disminuyen de volumen al remontarse, y desaparecen antes de llegar al nivel superior del líquido. Entonces se oye un rumor particular causado precisamente por la condensación de todas esas burbujas, ó más bien por el movimiento brusco del agua, que se precipita en cada uno de los pequeños vacíos causados por la condensación. Esto es lo que se expresa comúnmente diciendo que *el agua canta*.

Pero todavía no hierve el agua en este momento: en otros términos, la superficie líquida exterior continúa tersa, tranquila y horizontal. La agitación procedente de la formación activa del vapor está aún limitada á las capas inferiores; aún no ha llegado á las más elevadas. Esto consiste en que la elevación de temperatura no es uniforme; pero las corrientes suscitadas en la masa por la ascensión del agua más caliente y por lo tanto más ligera, y el calor desprendido por las burbujas que se suceden sin interrupción, generalizan muy en breve el fenómeno. Las burbujas de vapor que desaparecían poco antes sin llegar á la superficie, suben ya hasta ésta, y al reventar rompen el equilibrio, viéndose entonces el hervor en toda la masa. El fenómeno de la ebullición es ya completo.

Veamos ahora cuáles son las leyes del fenómeno. Estas se refieren por una parte á la temperatura del punto de ebullición, y por otra á la tensión del vapor que se desprende á causa del cambio de estado.

La primera ley, reconocida experimentalmente por Dalton con el aparato de la figura 575, se enuncia de este modo:

*La fuerza elástica de un vapor durante la ebullición es constantemente igual á la presión exterior soportada por la superficie del líquido en el momento del experimento.* Si el líquido hierve al aire libre, la presión barométrica será la medida de la tensión de su vapor. Luego veremos las consecuencias de esta primera ley.

Se la comprueba también simplificando el aparato de Dalton, como se ve en la figura 581. Un tubo encorvado A contiene mercurio de que está lleno su brazo más corto, excepto el espacio ocupado por una corta cantidad de agua. Adapta el tubo al cuello de una redoma de vidrio medio llena de agua, la cual se pone á hervir. El agua que está por encima del mercurio se reduce por sí misma á vapor (con exceso de líquido, si se ha puesto en cantidad suficiente), y entonces se ve bajar el mercurio en el brazo más corto y subir en el otro, hasta tener exactamente el mismo nivel en ambos. Así como en el brazo mayor abierto, la presión atmosférica es la que actúa; viéndose que es precisamente igual á la fuerza elástica del vapor á la temperatura de la ebullición.

La segunda ley consiste en que, *para una presión exterior dada, la temperatura de ebullición de cada líquido es fija, y subsiste constante mientras dura el fenómeno* (1). Llámase especialmente *punto de ebullición* á la temperatura de un líquido que hierve á la presión normal de 760 milímetros. De aquí se desprende una ley cuya exactitud se ha reconocido también con respecto á los otros cambios de estado de los cuerpos, la fusión y la solidificación, y de la cual resulta que un líquido puesto sobre un foco de calor se calienta con rapidez antes de llegar al punto de ebullición, pero que una vez llegado, cesa de calentarse, cualquiera que sea la intensidad del calor del foco. Si se le activa, no se consigue otra cosa sino hacer más pronta la vaporización, pero la temperatura del líquido ó de su vapor permanece invariable. Esto justifica la elección del punto de ebullición del agua, á la presión de 760 milímetros, como segundo punto fijo de la escala termométrica.

(1) Esta ley fundamental del fenómeno de la ebullición puede también enunciarse así: "La temperatura de ebullición de un líquido es aquella á la cual la tensión máxima de su vapor es precisamente igual á la presión que el líquido soporta." Dulong la demostraba experimentalmente con el aparato representado en la figura 581 y que es, por decirlo así, el experimento inverso de que se valió Regnault para medir la tensión de los vapores á grandes temperaturas. El tubo inclinado en que se condensa el vapor formado en la retorta comunica con un globo lleno de aire en relación con un manómetro. Cualquiera que fuese la presión marcada por éste, dicha presión era siempre exactamente igual á la tensión máxima del vapor correspondiente á la temperatura marcada por el termómetro.

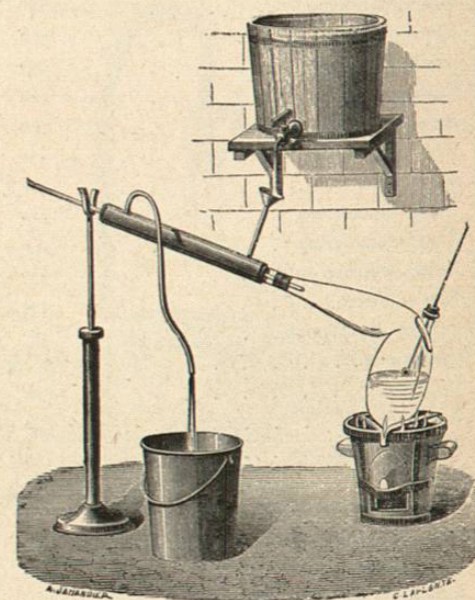


Fig. 581. — Demostración de la segunda ley de la ebullición. Aparato de Dulong

Una consecuencia importante de la constancia de la temperatura mientras dura el fenómeno de la ebullición, es que el calor comunicado por el foco á los líquidos para este cambio de estado lo absorbe enteramente el vapor á medida que se va formando. Esto es lo que se llama *calor latente de vaporización*, el cual, según pronto veremos, queda libre ó sensible cuando el vapor pasa al estado líquido.

## CUADRO DE LOS PUNTOS DE EBULLICIÓN DE VARIOS LÍQUIDOS

Á LA PRESIÓN NORMAL DE 760 MILÍMETROS

LÍQUIDOS	Temperaturas	LÍQUIDOS	Temperaturas
Protóxido de ázoe. . . . .	- 88°	Clorhidrato de amoníaco (sol. sat.) . . . . .	+ 114° 2
Ácido carbónico. . . . .	- 78°	Bicloruro de estaño. . . . .	115° 4
Cloro líquido. . . . .	- 40°	Ácido acético concentrado. . . . .	120°
Amoníaco anhidro. . . . .	- 35°	Ácido nítrico (4 equival. de agua). . . . .	123°
Cianógeno. . . . .	- 18°	Carbonato de potasa (sol. sat.) . . . . .	135°
Ácido sulfuroso. . . . .	- 10°	Esencia de trementina. . . . .	156° 5
Eter clorhídrico. . . . .	+ 11°	Potasa cáustica (solución saturada). . . . .	175°
Aldehído. . . . .	20° 8	Yodo. . . . .	176°
Ácido hiponítrico. . . . .	25°	Yoduro de plata. . . . .	176°
Ácido cianhídrico. . . . .	26° 2	Cloruro de calcio (solución saturada). . . . .	179° 5
Ácido sulfúrico anhidro. . . . .	32°	Éter oxálico. . . . .	183°
Eter sulfúrico. . . . .	33° 5	Creosota. . . . .	203°
Sulfuro de carbono. . . . .	48°	Alcanfor del Japón. . . . .	205°
Cloroformo. . . . .	60° 8	Naftalina. . . . .	210°
Bromo. . . . .	63°	Alcanfor de Borneo. . . . .	215°
Eter acético. . . . .	74° 1	Fósforo. . . . .	290°
Alcohol absoluto. . . . .	78° 3	Ácido sulfúrico monohidratado. . . . .	326°
Bencina. . . . .	80° 8	Mercurio. . . . .	350°
Ácido nítrico monohídrico. . . . .	86°	Parafina. . . . .	370°
Eter sulfhídrico. . . . .	91°	Aceite de linaza. . . . .	387° 5
Agua destilada. . . . .	100°	Azufre. . . . .	440°
Sulfato de sosa (solución saturada). . . . .	103°	Selenio. . . . .	650°
Agua de mar. . . . .	103° 7	Sodio. . . . .	700°
Carbonato de sosa (solución saturada). . . . .	104° 6	Cadmio. . . . .	860°
Petróleo. . . . .	106°	Cinc. . . . .	1,300°
Cloruro de sodio (solución saturada). . . . .	108° 4		

## V

## INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LA TEMPERATURA DE EBULLICIÓN

Acabamos de ver que la tensión del vapor de un líquido en ebullición es igual á la presión exterior, ó más generalmente á la presión que soporta la superficie del líquido; por otra parte, sabemos que la tensión varía, relativamente á un mismo líquido, con la temperatura, y aumenta á medida que ésta crece. La consecuencia que se deduce de ambas leyes es que la temperatura de ebullición de un líquido debe variar á su vez con la presión, aumentando si ésta aumenta, y disminuyendo si disminuye. La experiencia confirma completamente la exactitud de esta consecuencia; pero antes de presentar ejemplos de las variaciones del punto de ebullición, ocupémonos del fenómeno mismo y de las circunstancias que lo acompañan.

Al examinar lo que ocurre en una vasija llena de agua que se calienta progresivamente hasta la ebullición completa del líquido, hemos visto que las primeras burbujas de vapor que se forman en el fondo de la vasija no suben desde luego á la superficie. La fuerza elástica en virtud de la cual se desprenden aquéllas del fondo ha de ser bastante grande para contrarrestar la presión que soportan las capas inferiores del líquido, presión que se compone de dos elementos, á saber: por una parte la del agua, y por otra la atmosférica, si se ha calentado la vasija al aire libre. Luego la fuerza elástica del vapor aumenta con la temperatura.

Quando se forman en el fondo de la vasija las primeras burbujas de vapor, consiste en que la tensión de estas burbujas es desde un principio bastante fuerte para equilibrar dicha doble presión; una vez formadas, se remontan á causa de su ligereza específica;



Fig. 582.—Fase de la ebullición completa: las burbujas revientan en la superficie



Fig. 583.—Ebullición del agua en el vacío

pero como no todas las capas de agua que atraviesan tienen la misma temperatura, pues las más elevadas están momentáneamente más frías, las burbujas se enfrían al subir, se condensan por efecto de este enfriamiento, disminuyen de tamaño y por último se deshacen. Esto explica por qué pasan enteramente al estado líquido antes de haber llegado al nivel del agua de la vasija.

Sin embargo, poco á poco se calienta el agua por todas partes, ya por mezclarse las corrientes líquidas ascendentes y descendentes, ó bien por el calor que le ceden las burbujas de vapor al condensarse, y por fin la tensión de éstas es bastante grande para que puedan conservar su estado al hacer su ascensión completa. Entonces se las ve aparecer á la superficie envueltas en tenues capas de agua hemisféricas. En tal estado sólo tienen que soportar ya la presión atmosférica, y entonces revientan, suscitando en la superficie del líquido un movimiento tumultuoso, indicio visible de la ebullición propiamente dicha (fig. 582). Es por tanto evidente que en tal momento la tensión del vapor es precisamente igual á la presión exterior, á la atmosférica, si la vasija está destapada y al aire libre. El raciocinio confirma lo que demuestra la experiencia.

Ocupémonos ahora de los hechos que prueban que la temperatura del punto de ebullición de un líquido disminuye cuando la presión exterior disminuye á su vez.

Tomemos un globo de vidrio medio lleno de agua á una temperatura inferior á la de la ebullición al aire libre (fig. 583). Por el tubo de esta espita de que está provisto pongámosle en comunicación con la máquina neumática, y en seguida hagamos el vacío. A medida que se extrae el aire contenido en el globo, disminuye la presión que este aire ejercía sobre la superficie. Cuando el enrarecimiento es suficiente, se ve hervir el agua; sólo que las burbujas de vapor, en vez de partir del fondo de la vasija como sucedía en nuestro primer experimento, nacen ahora en las capas superiores porque la presión es más débil en ellas. Por lo demás la ebullición para en breve; lo cual consiste en que, acumulándose el vapor formado, gravita sobre la superficie del agua. Si se continúa haciendo el vacío, vuelve á empezar la ebullición. Haciendo un vacío tan completo como sea posible, se podría hacer hervir el agua, sin que su temperatura excediese mucho de 0° que es la del hielo fundente. He aquí ahora otro experimento que sirve para demostrar que el agua puede hervir ó vaporizarse por ebullición á una

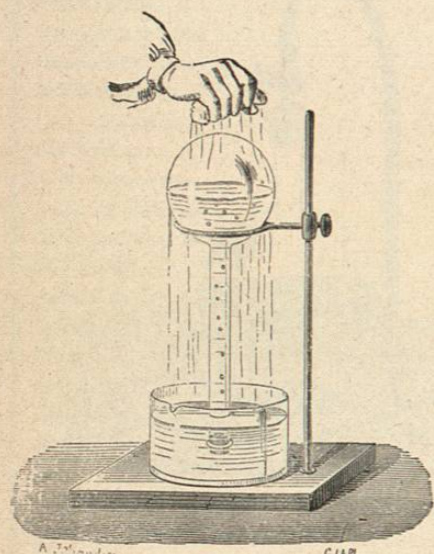


Fig. 584.—Ebullición del agua por enfriamiento

temperatura menor de 100°, pero siempre por la disminución de la presión sobre la superficie del líquido. Expónese primero al aire libre el agua contenida en una redoma de cuello largo que se coloca luego en un hornillo encendido, sometiéndola á una ebullición bastante prolongada para que el aire de la redoma sea expelido por el vapor que se escapa de ella. Tápase entonces la redoma, se la retira del fuego, y á fin de evitar que el aire penetre de nuevo, se la da vuelta metiendo su cuello en el agua de otra vasija. Si se enfría entonces la redoma rociándola con agua fría (fig. 584) ó cubriéndola de pedazos de hielo, el vapor interior se condensa; el vacío que se forma es causa de que disminuya la presión, y la ebullición empieza otra vez. De este modo parece *que se haga hervir el agua enfriándola*.

Este experimento nos ilustra asimismo acerca de una circunstancia sobrado importante, y es que un descenso cualquiera en la temperatura vuelve el vapor, en parte al menos, á su estado líquido, esto es, lo condensa. Pronto nos ocuparemos con mayor amplitud de este fenómeno, inverso del de la evaporación ó de la vaporización.

Finalmente, hay otro modo de hacer hervir el agua á una temperatura menor de 100°: consiste en subir á sitios en que la presión atmosférica sea inferior á 760 milímetros. Y en efecto, la experiencia demuestra que en las montañas el agua hierve á menos de 100°. Saussure ha visto que la temperatura de la ebullición del agua en la cumbre del monte Blanco era de 86°, no siendo á la sazón la altura del barómetro sino de 434 milímetros; Bravais y Martins han hecho experimentos por el estilo en los Grands Mulets, en los flancos del mismo monte; el agua hervía á 90° con una presión de 529 milímetros, observando además que en la cima del monte Blanco era la temperatura de la ebullición de 84°,4, con una presión barométrica de 424 milímetros. En la cúspide del monte Rosa, Tyndall ha visto que el agua hervía á 84°,95. En México la temperatura de la ebullición es de 92°.

Por consiguiente, la ebullición del agua no es necesariamente una prueba de la gran

elevación de su temperatura, toda vez que la temperatura del punto de ebullición baja al mismo tiempo que la presión exterior. En los países de considerable altitud no se pueden hacer, sino difícil é imperfectamente, ciertas operaciones culinarias con agua hirviendo. "Asegúrase, dice Tyndall, que para hacer en Londres un buen te se requiere absolutamente agua hirviendo á 100°. Si esto es así, no sería posible hacer á esta temperatura dicha bebida con toda su excelencia en los sitios más elevados de los Alpes."

Compréndese por lo tanto que si en vez de disminuir la presión soportada por la superficie del líquido se la aumenta de modo que se la haga pasar de 760 milímetros, la ebullición se retrasará tanto más cuanto más fuerte sea la presión. En tales condiciones el agua hierve á temperaturas que pueden ser muy superiores á 100°. Un medio muy sencillo de aumentar esta presión consiste en utilizar el vapor mismo, la fuerza elástica de que está dotado, fuerza que patentizaremos muy en breve y cuyas variaciones estudiaremos con cuidado, puesto que en ella está basado el principio de la máquina de vapor.

A Papin, el inmortal inventor de la máquina de vapor, se debe el descubrimiento de este hecho, que supo utilizar inventando la marmita conocida con su nombre, y cuya descripción publicó en Londres, en 1681, con el título de *New Digester*.

He aquí en qué consiste la olla ó marmita de Papin.

Es una vasija ó recipiente cilíndrico, de hierro ó de bronce, de paredes recias y resistentes, tapada con una tapadera del mismo metal que, por medio de un tornillo de presión, va sujeta á los bordes de la vasija. Llenándola de agua en sus dos terceras partes y poniéndola al fuego, fórmase en breve vapor en cantidad siempre creciente; mas como éste no tiene salida, se acumula encima del líquido, en cuya superficie ejerce una presión cada vez mayor. El agua puede llegar de este modo, sin necesidad de hervir, á una temperatura que exceda con mucho de 100°, capaz de fundir ciertos metales, como estaño, bismuto ó plomo (1). Las verduras y la carne se cuecen en ella con más prontitud que en el agua hirviendo ordinaria, y las sustancias susceptibles de disolverse, como la gelatina de los huesos, se ablandan y deshacen con mucha facilidad. Valiéndose de la enérgica acción del agua así calentada con exceso, se ha sacado gelatina de los huesos fósiles que habían pertenecido á mastodontes y otros animales antediluvianos que vivieron hace algunos millares de siglos.

En ciertas condiciones, la presión del vapor puede llegar á tener una fuerza considerable, que comprimiendo á la vez la superficie del líquido y las paredes de la vasija, la expone á que estalle, haciendo peligroso el experimento. Por esta razón va provista la marmita de una válvula de seguridad. En la tapadera hay un agujero, y sobre la

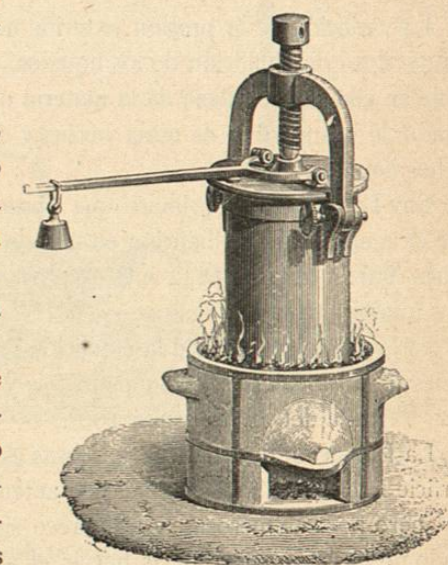


Fig. 585.—Marmita de Papin

(1) Ya hemos visto que el estaño se funde á los 235°, el bismuto á los 265 y el plomo á los 335 centígrados.