

los períodos jurásico, cretáceo, carbonífero, devónico, etc. Algunos de los animales y de los vegetales encontrados en las capas de los terrenos correspondientes necesitaban para vivir y desarrollarse temperaturas infinitamente más altas que las que hoy se observan en las mismas latitudes. ¿En qué condiciones estaba nuestro planeta para que hayan podido ocurrir tan considerables modificaciones en el espacio de tiempo, á decir verdad de incalculable inmensidad, que nos separa de dichas edades? ¿Es que el Sol radiaba con mayor intensidad ó que sus dimensiones eran mucho mayores? ¿O bien la composición de nuestra atmósfera, más rica en ácido carbónico, más dilatada, más densa y más absorbente, permitía la difusión casi uniforme del calor solar en las diferentes latitudes? ¿Intervenía el calor del foco central y agregaba su influencia á una ú otra de estas causas? Cuestiones son estas muy interesantes, como se ve, pero que deben limitarse á conjeturas y que están relacionadas con varias ciencias, como Astronomía, Geología, Meteorología, etc. A la ciencia del porvenir toca resolverlas.

Aquí termina la tarea que nos habíamos impuesto de presentar en este último tomo del MUNDO FÍSICO el cuadro de los principales fenómenos meteorológicos y la exposición elemental de sus leyes, con arreglo á los descubrimientos más recientes de la Ciencia. Hemos tenido que hacer caso omiso de muchos puntos secundarios de este asunto; pero no parecerá tan incompleto si el lector tiene á bien agregarle todos los capítulos ó todos los artículos de los tomos anteriores que tratan de cuestiones especiales de Física del globo y de Meteorología, y cuyo sitio estaba marcado allí por el enlace de cada una de ellas con el agente físico estudiado particularmente en cada parte de nuestra obra.

Esta debía terminar aquí también, si nouviésemos que decir todavía algo sobre ciertos fenómenos de física molecular que son demasiado importantes para pasarlos en silencio, y que por tanto servirán de asunto para el breve apéndice que incluimos á continuación.

LA FÍSICA MOLECULAR

I

LAS FUERZAS MOLECULARES

Todo cuanto la observación experimental nos ha permitido aprender acerca de las propiedades de la materia, ponderable ó imponderable, nos conduce á considerar los cuerpos como constituídos por la aglomeración de partículas separadas. Estas partículas son los *átomos* ó las *moléculas*, según que se trate de cuerpos químicamente simples ó de cuerpos compuestos. Estas partículas, sumamente tenues, situadas entre sí á distancias variables, pero muy reducidas, están sumergidas en el medio imponderable, elástico y fluido cuyas ondulaciones sirven para explicar los fenómenos de calor y de luz, y quizás también los de gravedad, electricidad y magnetismo. Supónese que el éter, no tan sólo penetra en los vacíos intermoleculares, sino que también envuelve á cada molécula en un cuerpo ó en una atmósfera más ó menos condensada. El éter es un océano indefinido, en cuyo seno nadan, como islas en otros tantos archipiélagos, todas las aglomeraciones materiales á las cuales reservamos el nombre de cuerpos. El es sin duda el que sirve de medio de transmisión para todos los movimientos que los cuerpos se comunican entre sí, bajo las variadas formas de gravedad, radiaciones caloríficas y luminosas y corrientes magnéticas ó eléctricas.

Sabemos asimismo—especialmente por los continuos cambios de volumen ó de estado físico que las vibraciones del calor producen en los sólidos, en los líquidos y en los gases, y también por los fenómenos de las vibraciones sonoras—que las moléculas se hallan en perpetua agitación, aun en los cuerpos que parecen más estables, y que oscilando sin cesar alrededor de un estado de equilibrio, les acontece á veces separarse de él lo bastante para romperlo, ora á fin de recobrar el estado primitivo si se reproducen las condiciones necesarias, ora para constituir uno nuevo, situándose de nuevos modos, si persisten las causas que habían motivado la ruptura. Por esto hemos visto que, por efecto de las variaciones de presión y de temperatura, los cuerpos pasan del estado sólido al líquido y al gaseoso ó recíprocamente, dependiendo la diferencia entre estos tres estados de la mayor ó menor estabilidad de la mutua conexión de las moléculas.

Estos movimientos invisibles de las últimas partículas de la materia, estas oscilaciones cuya forma, velocidad y amplitud subsisten en estado de hipótesis, presuponen la existencia de fuerzas que les son propias y que residen en estas partículas. Tales son las *fuerzas moleculares*. Háseles dado diferentes nombres, por ejemplo, los de *cohesión*, *afinidad*, según que se trate de la fuerza que une á todas las moléculas de un cuerpo entre sí, ó de la que produce la combinación química de dos cuerpos diferentes.

Pero ¿qué fuerzas son estas? ¿Son distintas de los agentes físicos cuyos efectos hemos estudiado en el curso de esta obra, ó bien manifestaciones especiales ó transformaciones de ellos (1)? Cuestiones son estas de alta filosofía científica que indudablemente no se resolverán *á priori*, sino, como todas las cuestiones de la misma clase, mediante la observación y la experimentación, y por el cálculo matemático aplicado á los datos por éstas suministrados.

Más de una vez hemos tenido que invocar en esta obra la existencia de estas fuerzas moleculares, ó si se prefiere, que hacer constar los movimientos íntimos que suscitan en la materia, ya para explicar ciertos fenómenos que modifican esta ó la otra ley física, ya para dar cuenta de esta ley. Por ejemplo, los *fenómenos capilares* son una derogación aparente de las leyes de la hidrostática y suponen la existencia de una fuerza diferente de la gravedad, que tiende á atraer ó á repeler, según los casos, las moléculas fluidas de la inmediación de los cuerpos sólidos. La *elasticidad* en los sólidos y en los líquidos, lo propio que en los gases, es necesaria para explicar las ondulaciones ó vibraciones sonoras; la misma propiedad, considerada en el éter, forma la base de toda la teoría moderna de la luz y del calor. Las dilataciones y las contracciones, los cambios de estado físico, los fenómenos de *disolución*, *difusión*, *sobrefusión*, *crystalización* y *alotropía* no pueden explicarse sino atribuyéndolos á movimientos moleculares, á rupturas de equilibrio, á agrupaciones nuevas en los sistemas de moléculas. No se comprende el estado gaseoso sino suponiendo que los vínculos que en un principio mantenían al cuerpo sólido ó líquido y agrupaban sus moléculas á distancias mutuas reducidísimas, se rompen á causa de la intervención de una fuerza antagónica.

En la mayoría de los fenómenos físicos ó químicos, las acciones moleculares desempeñan un papel importante, ya que no preponderante. Aquí sólo consideramos los primeros y, lo repetimos, muchas veces ya hemos tenido que describir fenómenos que son del dominio de la Física molecular. Esta última parte del MUNDO FÍSICO, esta especie de apéndice no estaría justificado, si su objeto no fuese el de completar nuestras descripciones, consagrando algunos artículos á cierto número de fenómenos que no han hallado cabida en otra parte: á los *fenómenos capilares*, á los de *difusión* y de *penetración* de los gases y de los líquidos, ya entre sí ó ya en los cuerpos sólidos, donde parecen sufrir transformaciones cuyo estudio es del más alto interés científico.

II

LOS FENÓMENOS CAPILARES

Nadie ignora que si se pone la superficie inferior de un terrón de azúcar, ó un pedazo de creta ó de un cuerpo poroso cualquiera, en contacto con un líquido, este pedazo se empapa con mayor ó menor rapidez á causa de la ascensión del líquido al través de sus poros. Un fenómeno análogo es el que hace subir el aceite por las fibras de la

(1) Esta última hipótesis es la más comúnmente adoptada hoy día. "Todos los trabajos, todas las tendencias de la ciencia moderna, dice H. Sainte-Claire Deville, vienen á parar á la identificación de las fuerzas que intervienen en los fenómenos físicos y químicos de la naturaleza. Todas las determinaciones numéricas nos conducen á establecer su equivalencia de una manera rigurosa. La afinidad y la cohesión no pueden eximirse de esta identificación, y la teoría mecánica las engloba ya en un círculo de raciocinios que muy pronto deben hacer desaparecer todo lo vago y misterioso que aún presentan." (*Lección sobre la disociación.*)

mecha de una lámpara. Mucho tiempo hace que se conocen estos casos, pero no se han estudiado científicamente hasta hace poco más de dos siglos, dado que al parecer Pascal no tuvo noticia de los primeros experimentos á que se los sometió. Hicieron estos experimentos con unos tubos de escásísimo diámetro, comparables por esta razón al grueso de un cabello, lo cual hizo dar á estos fenómenos el nombre de *fenómenos capilares*.

Tomemos un tubo de vidrio cuya superficie interior se haya limpiado perfectamente, metámoslo verticalmente en agua (fig. 224), y veremos en seguida cómo sube el líquido por el interior del tubo hasta su nivel superior al del agua de la vasija. Sucede lo propio si en lugar de agua se emplea éter, alcohol, y en general un líquido que moje el vidrio. Pero si se hace este experimento con mercurio, líquido que no moja el tubo, en lugar de una ascensión se observará una depresión y el nivel interior quedará por debajo del

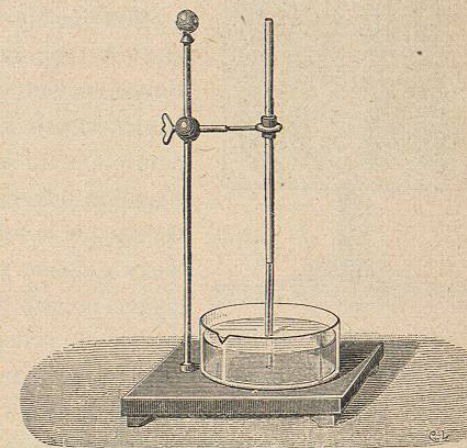


Fig. 224.—Ascensión del agua en un tubo circular

líquido exterior. Estos dos fenómenos opuestos se comprueban perfectamente en la figura 225, en la que además se ve la forma particular de las superficies líquidas terminales en los puntos más inmediatos al tubo, ya en el interior ó bien en el exterior de éste. Dicha forma es cóncava en el caso de que el líquido moje el tubo al ascender, y convexa en el caso de la depresión. Una simple placa sumergida en agua ó en mercurio presentará también en las paredes en contacto las dos mismas formas de curvatura.

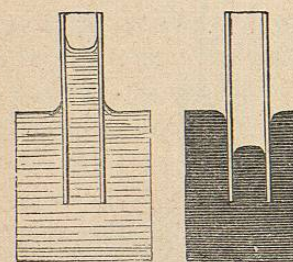


Fig. 225.—Meniscos en los tubos capilares

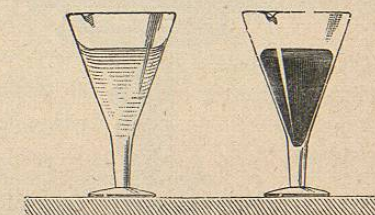


Fig. 226.—Forma convexa ó cóncava de las superficies terminales en los bordes de los vasos

Se comprueba asimismo la ascensión y la depresión de los líquidos en los tubos capilares, empleando un aparato compuesto de tubos de vidrio verticales y encorvados en U, uno de cuyos brazos es de gran diámetro, y el otro es un tubo de diámetro muy pequeño. La diferencia de los niveles en los dos brazos de este sifón invertido se hace ostensible al punto. Si el líquido es agua, el nivel está más alto en el tubo capilar; si mercurio, más bajo. También se ve fácilmente la forma de las superficies terminales, cóncava en el primer caso y convexa en el segundo. Además, si los diferentes tubos capilares tienen distintos diámetros, se puede comprobar que la ascensión ó la depresión es tanto mayor cuanto menor sea el diámetro del tubo en que tenga lugar.

Como decíamos antes, los fenómenos capilares son una derogación de las leyes de

la hidrostática, las cuales exigen que haya igualdad de nivel entre superficies líquidas en los vasos comunicantes. Así, pues, para explicarlos, ha sido forzoso suponer la intervención de fuerzas que se desarrollan entre las moléculas de los sólidos y de los líquidos, cuando estas moléculas se encuentran frente a frente, ya en contacto, ó ya á muy cortas distancias.

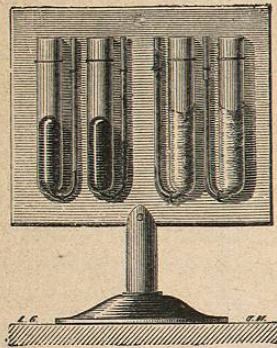


Fig. 227.—Ascensión y depresión de los líquidos en los tubos capilares.

Pero antes de poder abordar la teoría, hay que hacer muchos experimentos y variar de todos modos las condiciones en que se producen los fenómenos capilares. Los académicos de Florencia consignaron desde el principio un punto importante: habiendo repetido en el vacío los experimentos que habían hecho primeramente al aire libre, vieron que la ascensión y la depresión observadas persistían, de donde sacaron la consecuencia de que no había lugar á recurrir á la acción de la presión atmosférica. Newton fué el primero á quien se le ocurrió explicar la ascensión del agua por un tubo, ó entre dos placas de vidrio paralelas, atribuyéndola á una atracción análoga á la que

mantiene reunidas las moléculas de los cuerpos sólidos. Pero esta hipótesis no pudo tomar cuerpo hasta que se descubrieron las leyes de este fenómeno. Fué preciso que se estudiara sucesivamente la influencia de la naturaleza del líquido, de su temperatura, de su densidad, y puesto que los fenómenos eran mucho más marcados cuanto más finos los tubos capilares, cerciorarse de la ley á que obedece la altura cuando se hace variar su diámetro. Jurín, físico del siglo pasado, fué quien descubrió esta ley.

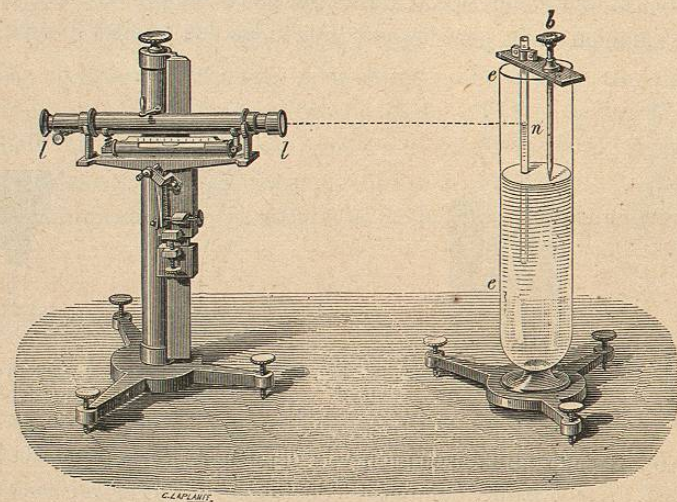


Fig. 228.—Aparato de Gay-Lussac para la comprobación de la ley de los diámetros en los tubos capilares

Jurín demostró que para un mismo líquido que moje el tubo, la altura á la que se eleva sobre el nivel exterior varía en razón inversa del diámetro del tubo. Los experimentos que permiten comprobar esta ley son muy delicados, habiéndolos reproducido con todas las precauciones Gay Lussac, que se valió con este objeto de la disposición indicada en la figura 228. Es un catetómetro con el cual se mide la distancia vertical entre el nivel del líquido en el tubo capilar y el nivel exterior, marcado por la punta de

una varilla que roza con la superficie de este último. Gay Lussac empleó tubos cuyo diámetro variaba entre 1^{mm},3 y 10^{mm},5; pero la ley no se comprueba sino con tubos cuyos diámetros no pasan de 2 ó 3 milímetros. La clase de la materia del tubo no influye en nada; al principio se había creído lo contrario, porque no se había tenido la precaución de limpiar perfectamente su superficie interior y mojarla antes de introducir en ella el líquido. No sucede lo propio con la naturaleza de éste. Para un tubo de diámetro determinado, la altura de la columna capilar varía de un líquido á otro; las cifras siguientes, tomadas de los experimentos de Frankenheim, son las relativas á la ascensión de varios líquidos por un tubo cuyo diámetro es de 1 milímetro á 0°:

Líquidos	Altura de la columna
Agua.	30 ^{mm} ,73
Esencia de trementina.	13 ^{mm} ,52
Alcohol.	12 ^{mm} ,82
Eter.	10 ^{mm} ,80
Sulfuro de carbono.	10 ^{mm} ,20
Azufre á 100°.	4 ^{mm} ,61

La temperatura del líquido ejerce también su influencia: la altura de la ascensión va disminuyendo á medida que el líquido se calienta. Además, según las investigaciones de M. Wolf, que ha hecho experimentos con éter sulfúrico, alcohol y sulfuro de carbono calentándolos en tubos cerrados, el menisco cóncavo terminal se aplana cada vez más á medida que la temperatura se eleva, y acaba por ser plano y hasta por convertirse en un menisco convexo, cuando aquélla es bastante elevada.

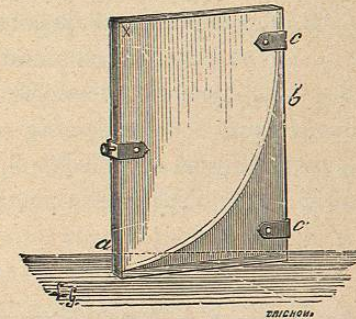


Fig. 229.—Ascensión de un líquido entre dos láminas inclinadas

También se verifica la ley de los diámetros con respecto á los líquidos que, como el mercurio, no mojan los tubos; pero entonces, según lo ha demostrado Avogadro, la naturaleza de la substancia del tubo influye en la depresión cuando el diámetro es el mismo; así es que en dos tubos de un milímetro de diámetro, uno de hierro y otro de platino, dicho físico notó una depresión de 1^{mm},226 en el primero, y sólo de 0^{mm},635 en el segundo.

Se pueden considerar todos estos resultados de la experiencia como otras tantas consecuencias de una teoría establecida por Laplace, basándose en la hipótesis de atracciones moleculares recíprocas que los sólidos y los líquidos ejercen unos sobre otros ó sobre sus propias moléculas á distancias extraordinariamente reducidas, y que cesan de obrar así que éstas son perceptibles. La forma y la curvatura de los meniscos dependen de la relación que existe entre la acción de las paredes sólidas sobre el líquido y la de éste sobre sí mismo. La resultante de las acciones combinadas de estas dos fuerzas y de la gravedad depende de sus intensidades respectivas; puede ser vertical, en cuyo caso la superficie terminal es plana y el menisco no existe; ó inclinada en dos sentidos opuestos con relación á la pared sólida, y entonces el menisco, cóncavo en un caso, es convexo en el otro. Por último, de la forma y curvatura del menisco dependen las alturas de la columna ascendente ó de la depresión, las cuales, como acabamos de ver, varían en razón inversa del diámetro de los tubos.

En lugar de tubos, se puede hacer uso para observar los fenómenos capilares de paredes sólidas de cualquier forma. La ascensión tiene efecto entre dos láminas paralelas con arreglo á la misma ley que rige para los tubos, con la condición de que se ha de considerar la distancia entre las láminas igual no más al radio del tubo; lo que equivale á decir que las alturas del líquido no son más que la mitad de las que se observarían en los tubos que tuviesen por diámetros las distancias que median entre las láminas.

Cuando en lugar de láminas ó placas paralelas se emplean dos láminas que forman entre sí cierto ángulo, pequeñísimo en verdad, y se las sumerge en un líquido capaz de mojar sus paredes, he aquí lo que se observa: El líquido va elevándose cada vez más á medida que se estrecha el intervalo que separa las dos láminas. Si éstas son de vidrio y transparentes, y se hace el experimento con agua teñida de algún color, la superficie terminal de la lámina líquida interpuesta traza una curva que no es otra cosa sino una rama de hipérbola equilátera.

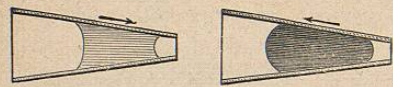


Fig. 230.—Fenómenos capilares en los tubos cónicos

Con un tubo de forma cónica, el fenómeno presenta una particularidad notable. Una gota de agua ó de cualquier otro líquido que moje las paredes, termina por ambos lados en meniscos cóncavos, cuya curvatura es mayor hacia el vértice del cono. Si el eje del tubo es horizontal, la gota se corre hacia dicho vértice; si inclinado al horizonte, de modo que el vértice esté á un nivel más alto que la base, la gota se detiene en una posición de equilibrio que se puede calcular de antemano. Cuando se hace uso de mercurio en lugar de agua, la gota se aleja del vértice del cono. Dase el primer caso en el movimiento del agua en las pipetas, y también en el de la tinta de los tiralíneas, la cual propende á salir por la punta á medida que se extiende sobre el papel.



Fig. 231.—Repulsión de dos cuerpos flotantes en la superficie de un líquido

Proviene asimismo de la capilaridad los movimientos de atracción y repulsión que se observan entre cuerpecillos ligeros que flotan en la superficie de un líquido. Si estos cuerpos son, por ejemplo, dos bolas igualmente mojadas por el líquido, véelas precipitarse una sobre otra, así que están á una distancia bastante corta para que lleguen á juntarse los meniscos cóncavos que las rodean. Un fenómeno semejante ocurre con dos bolas que no estén mojadas por el líquido. En cambio hay repulsión (fig. 231) si uno de los cuerpos se moja y el otro no (1). Para hacer estos experimentos con agua, se emplean bolitas de corcho; unas, en estado natural, se mojan, y otras, dadas de una capa grasa, no. Mariotte hizo un experimento curioso que tiene relación con el principio de estas atracciones. Llénanse de agua dos vasos ordinarios, uno de ellos hasta la

(1) Según las experiencias de Laplace, si las acciones de los dos cuerpos flotantes en el líquido no son iguales, el punto de inflexión de los dos meniscos no está en medio de su intervalo; si entonces se disminuye bastante este último, los dos cuerpos, en lugar de seguir repeliéndose, deben atraerse, y así lo confirma la experiencia.

mitad, y otro hasta que el líquido rebese. Entonces las burbujas de aire que se forman en la superficie del agua se reúnen en el centro en el segundo vaso, mientras que en el primero acuden hacia los bordes. Estas burbujas vienen á ser flotadores mojados que atrae el menisco cóncavo del borde en el primer vaso, y que repele el menisco convexo en el segundo. "Es el hecho común, dice M. Violle refiriéndose al experimento de Mariotte, de las burbujas de aire que en la superficie del café se dirigen al centro ó al borde, según que la taza esté seca ó húmeda."

En lugar de cuerpos más ligeros que el líquido, se puede hacer flotar en él cuerpos más densos, por ejemplo una aguja de acero en el agua, si se ha tenido cuidado de untarla de una capa de grasa, lo cual se obtiene frotándola simplemente con los dedos; un alambre de platino, que el mercurio no moja, flotará también en su superficie si se ha cuidado de ponerla en ella con precaución. En ambos casos, la depresión capilar tiene un volumen total bastante grande para que el peso del líquido así desalojado exceda al del cuerpo flotante. Esto explica la facilidad con que corren por la superficie del agua ciertos insectos cuyas patas terminan en tarsos impregnados de una materia grasienta; las depresiones capilares son tales, que el peso del agua desalojada es mayor que el del insecto. Los mismos insectos se hunden en el agua cuando se les pone en la superficie después de lavarles las patas con éter, que disuelve la substancia grasa de que las tienen naturalmente impregnadas.

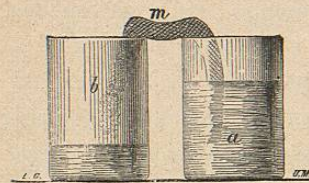


Fig. 232.—Ascensión de un líquido en los tejidos por efecto de la capilaridad.

Hemos citado anteriormente algunos ejemplos de fenómenos en que las acciones capilares desempeñan cierto papel. Podríamos añadir otros muchos. La hidrofana debe su transparencia á la capilaridad, cuando se la ha sumergido en agua y el líquido ha tenido tiempo de penetrar en aquella piedra; la luz, en un principio reflejada y difundida por las paredes de los canales interiores, pasa sin obstáculo gracias á la presencia del agua que los llena. La capilaridad da también á las piedras heladas su enojosa propiedad de abrirse por capas, cuando la congelación, aumentando el volumen del agua contenida en sus poros, produce la rotura de las paredes por el esfuerzo del hielo. La cola no prende bien entre dos pedazos de madera que se quiere pegar sino cuando la superficie de éstos está bastante seca para que la gelatina penetre por capilaridad á bastante profundidad. Por último, las tierras, como los tejidos, se empapan de algún líquido por influencia de las acciones capilares, efecto que se hace manifiesto valiéndose de un pedazo de lienzo á modo de sifón para transvasar un líquido de una vasija á otra (fig. 232). M. Janín ha hecho una serie de experimentos interesantes sobre la intervención de las mismas fuerzas en los fenómenos de imbibición de los cuerpos porosos, secos ó previamente mojados, y sobre el modo cómo los líquidos, al penetrar en el interior de estos cuerpos, repelen el aire aprisionado en los poros, del exterior al interior, hasta hacer adquirir al gas presiones de muchas atmósferas. Aplicando M. Janín á los vegetales los resultados de estos experimentos, demostró que podían bastar para explicar la ascensión de la savia por sus tejidos.

Los fenómenos de que vamos á tratar en el artículo siguiente no tienen menor importancia para interpretar multitud de hechos que el fisiólogo observa al estudiar la vida de los vegetales y la de los animales. Las aplicaciones científicas ó industriales de las leyes que regulan estos fenómenos son también cada vez más numerosas.

Se han construído tablas que marcan la corrección que se ha de hacer en las indi-