

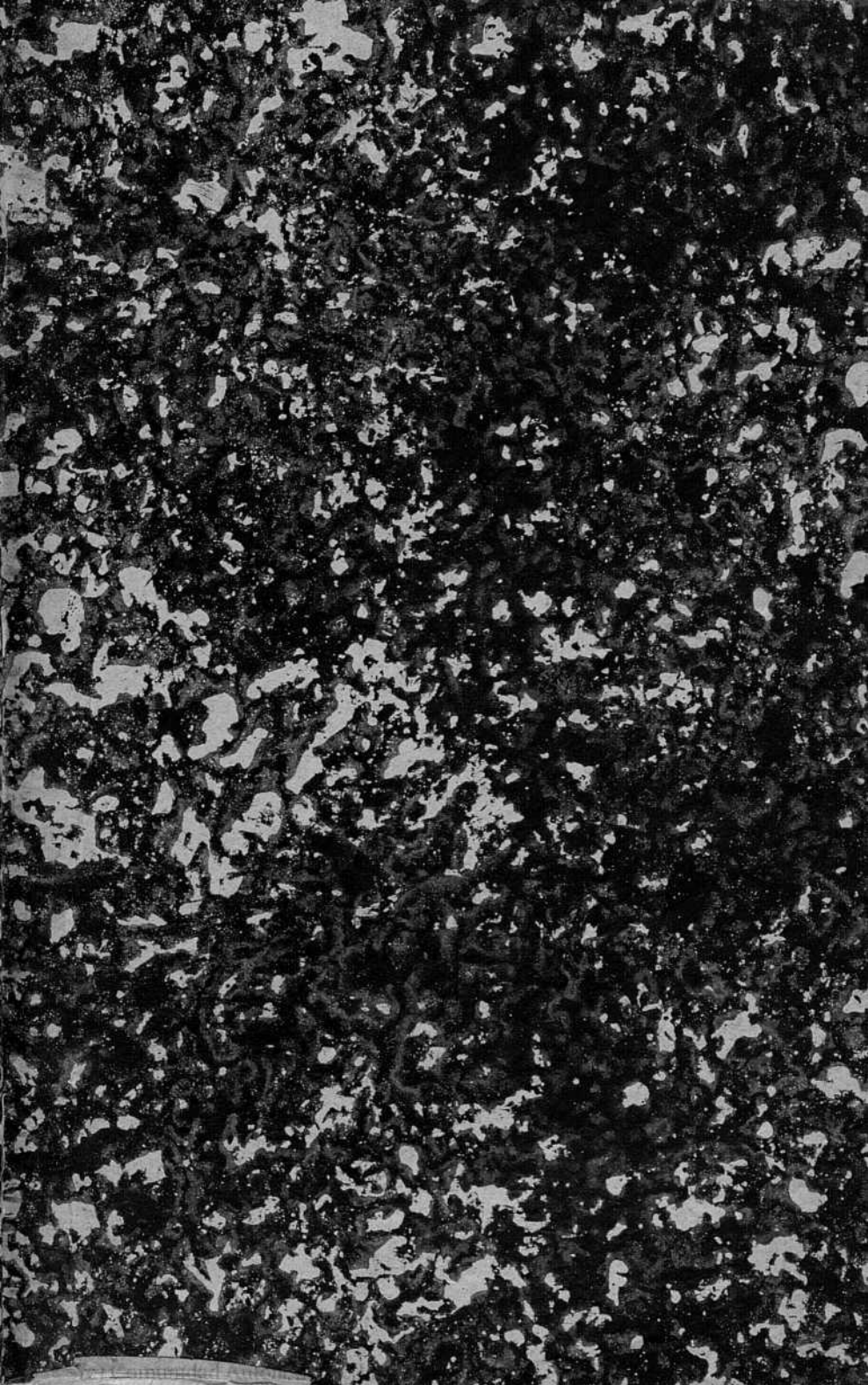


DO
VAL
A

N

U
U





TRATADO
ELEMENTAL DE FÍSICA

53 - MUÑ - tra



017904X

TRATADO ELEMENTAL DE FÍSICA

LECCIONES ESCRITAS

PARA LOS ALUMNOS QUE CURSAN ESTA ASIGNATURA
EN LA SEGUNDA ENSEÑANZA Y EN LA CÁTEDRA DE AMPLIACION
DE FÍSICA COMUN Á LAS FACULTADES DE CIENCIAS
MEDICINA Y FARMACIA,

por el Doctor

J. Muñoz del Castillo

CATEDRÁTICO DE FÍSICA Y QUÍMICA POR OPOSICION EN EL INSTITUTO
DE LOGROÑO, Y ACTUALMENTE DE AMPLIACION DE FÍSICA EN LA FACULTAD
DE CIENCIAS DE ZARAGOZA.

PRIMERA PARTE

NOCIONES GENERALES.—ATRACCION. ELASTICIDAD.

FORMAS FÍSICAS DE LA MATERIA.



ZARAGOZA

TIPOGRAFÍA DE COMAS, HERMANOS, GOYA, 12.

1882

R. 1.765

53^o
MUN
tra

TRATADO
ELEMENTAL DE FÍSICA

CUMPLIDAS LAS PRESCRIPCIONES DE LA LEY.

El Autor se reserva todos los derechos que
la misma le reconoce.
Los ejemplares van contraseñados.

AL LECTOR.

El libro que hoy ofrecemos á la juventud escolar, es fruto de bastantes años de meditacion.

Aun cursábamos los estudios de la Facultad de Ciencias en las aulas de la Universidad de Madrid, y ya eran objeto de atentas observaciones por nuestra parte las dificultades que opone la falta de método característica de muchos libros de enseñanza, para la asimilacion de las verdades en ellos consignadas; así como la aridez y cansancio que quedan en el campo de la razon despues de las ingratas batallas sostenidas hasta sacar fruto de las obras escritas sin un plan subordinado á los ideales de la ciencia y lógica y constantemente seguido y desenvuelto.

Y, por el contrario, nos complacíamos en reconocer las excelencias del método en las obras didácticas; las facilidades y ventajas inmensas que el mismo ofrece para la adquisicion del saber; y ese vigor y hasta goce intelectual que multiplica el poder de la razon, cuando acaparando esta rápidamente las verdades que le revelan las líneas de un libro metódicamente escrito, y amaestrada por el autor en las operaciones de relacionar, generalizar y sacar consecuencias, parece salirse de los límites de la obra y entrar llena de ilusiones, como impulsada por velocidad adquirida, en la region de las ideas propias y de la invencion.

Un libro escrito sin método arraiga con frecuencia errores y difunde fácilmente un concepto pobre ó equivocado de la materia que forma su objeto; de los libros escritos con método, es sin duda de los que un filósofo ha dicho que gobiernan el mundo.

Desde aquellas épocas, ya algo lejanas, que recordamos, ha sido nuestro ideal más acariciado la reforma completa que la enseñanza de la Física reclama; y durante los once años que hemos explicado en el Instituto de Logroño, no han cesado nuestros ensayos para metodizar y exponer la asignatura con arreglo á los principios que

informan hoy la ciencia, escribiendo y obligando á los alumnos á estudiar por medio de cuadernos partes enteras del presente libro, anotando los resultados, y en espera de que nuestro pensamiento estuviese completamente hecho, y contásemos con una clase más numerosa como base material, para lanzarnos á la publicacion de un tratado elemental de Física.

Nunca tuvimos ánimo de escribir prólogo alguno para nuestra obra, pues si bien pensamos alguna vez en hacerla preceder de la defensa razonada de su método expositivo, aun á esto hemos renunciado por último, decidiéndonos á entregarla lisa y llanamente á la ilustrada crítica de las personas entendidas en estudios físicos.

No se nos oculta lo árduo de la empresa que acometemos y la desproporcion grande que hay entre nuestras débiles fuerzas y el propósito que intentamos realizar; pero confiamos en que nuestros compañeros no nos exigirán una originalidad imposible, ni aun en la expresion de conceptos calcada muchas veces sobre la de los autores con quienes nos hallamos identificados, y únicamente juzgarán nuestro programa bajo el punto de vista de las novedades introducidas en la distribucion y orden de las diversas partes de la Física, y en la eleccion, en cantidad y calidad, de doctrina; puntos que han sido objeto culminante de nuestra atencion.

El ensayo que damos á luz, sin precedentes en España y con pocos fuera, adolecerá de los lunares propios de toda innovacion, y hasta abundará, contra nuestro deseo, en los defectos que tratamos de huir; por ello admitiremos con el mayor reconocimiento cuantas indicaciones se sirvan hacernos nuestros comprofesores; así como las noticias que sobre sus trabajos originales tengan á bien facilitarnos, al objeto de darles cabida en nuestra obra y de que esta tenga algun carácter español, ya que no haya llegado aun el venturoso día en que nuestros libros de ciencias naturales puedan escribirse bajo la base de las investigaciones de nuestros compatriotas.

Terminaremos indicando que las presentes lecciones están redactadas en armonía con nuestro libro titulado *Resúmen elemental de algunos capitulos de Mecánica*, al que nos referiremos además de un modo concreto siempre que lo consideremos oportuno por medio de una llamada: (Mec).

Zaragoza 3o de Setiembre de 1881.

José Muñoz del Castillo.

ADVERTENCIA.

El texto correspondiente á la segunda enseñanza va impreso con letra del cuerpo 9;

y lo que debe á nuestro juicio reservarse para los alumnos de Facultad con caracteres del 8, y marcados los párrafos con un asterisco (*): ambos tipos son elzevirianos.

El libro, pues, se estudiará por completo en las cátedras de AMPLIACION DE FÍSICA; y prescindiendo de lo impreso con letra del 8 en las de ELEMENTOS DE FÍSICA Y QUÍMICA.

Esto no obstante cada profesor puede establecer otros límites entre ambas enseñanzas sin inconveniente alguno, sobre todo disponiendo de tiempo para repasos.

En las aplicaciones, cuadros y notas se ha hecho uso de letra del cuerpo 6.

ABRIL 1974

ELEMENTOS DE FÍSICA POR JOSÉ MUÑOZ DEL CASTILLO.

PLAN-ÍNDICE DE LA PRIMERA PARTE.

Libros.	I. NOCIONES GENERALES. Pág. 9.	II. ATRACCION.—ELASTICIDAD. Pág. 67.	III. FORMAS FÍSICAS DE LA MATERIA. Pág. 115.					Libros.		
Capítulos.	I.—Pág. 11. Materia y energía. II.—Pág. 24. Formas de la materia y de la energía. III.—Pág. 39. Constitucion material de los cuerpos. IV.—Pág. 51. Constitucion dinámica de los cuerpos. V.—Pág. 62. Grandes unidades de la Física. Plan de exposicion de la asignatura.	I.—Pág. 69. Atraccion universal.	II.—Pág. 93. Elasticidad.	I.—Pág. 117. Estado sólido.	II.—Pág. 133. Estado líquido.	III.—Pág. 177. Estado gaseoso.	IV.—Pág. 215. Estados intermedios. V.—Pág. 219. Estados hipotéticos.	Capítulos.		
Párrafos y Subpárrafos.	§ I.—Pág. 11. Materia. § II.—Pág. 12. Energía.	§ I.—Pág. 24. Formas de la materia. § II.—Pág. 28. Formas de la energía.	§ I.—Pág. 69. Gravitacion. § II.—Pág. 72. Gravedad.	§ I.—Pág. 93. Leyes experimentales. § II.—Pág. 105. Propagacion de las deformaciones.	§ I.—Pág. 117. Forma y estructura de los sólidos. § II.—Pág. 125. Propiedades mecánicas de los sólidos. § III.—Pág. 132. Rozamiento exterior de los sólidos.	§ I.—Pág. 133. Principio de Pascal. § II.—Pág. 143. Compresibilidad de los líquidos. § III.—Pág. 146. Cohesion de los líquidos. § IV.—Pág. 149. Tension superficial. § V.—Pág. 154. Difusion. § VI.—Pág. 157. Capilaridad. § VII.—Pág. 164. Vena y corrientes líquidas.	§ I.—Pág. 177. Ley de Mariotte.—Teoria de los gases. § II.—Pág. 189. Principio de Pascal. § III.—Pág. 195. Cohesion de los gases. § IV.—Pág. 197. Difusion. § V.—Pág. 200. Disolucion de los gases en los líquidos. § VI.—Pág. 202. Oclusion de los gases. § VII.—Pág. 203. Vena y corrientes gaseosas.	§ I.—Pág. 215. Estados pastoso ó viscoso y pulverulento. § II.—Pág. 216. Estado líquido gaseoso.	§ I.—Pág. 219. Materia radiante. § II.—Pág. 222. El éter.	Párrafos y Subpárrafos.
Apéndices.	Aplicaciones.—Pág. 48.	Aplicaciones, pág. 88.	Aplicaciones, pág. 173.	Aplicaciones, pág. 186 y 209.		Apéndices.				

SÉ MUÑOZ DEL CASTILL

PRIMERA PARTE.

III.

FORMAS FÍSICAS DE L

I.—Pág. 117.

Estado sólido.

II.—Pág. 133.

Estado líquido.

§ I.—Pág. 117.

Forma y estructura de los sólidos.

§ II.—Pág. 125.

Propiedades mecánicas de los sólidos.

§ III.—Pág. 132.

Rozamiento exterior de los sólidos.

- 1.º Deformaciones permanentes, pág. 125.
- 2.º Resistencia á la ruptura, pág. 129
- 3.º Rozamiento interior de los sólidos, página 131.

§ I.—Pág. 133.

Principio de Pascal.

§ II.—Pág. 143.

Compresibilidad de los líquidos.

§ III.—Pág. 146.

Cohesion de los líquidos.

§ IV.—Pág. 149.

Tension superficial.

§ V.—Pág. 154.

Difusion.

§ VI.—Pág. 157.

Capilaridad.

§ VII.—Pág. 164.

Vena y corrientes líquidas.

- 1.º Constitución de la vena, pág. 164.
- 2.º Enunciados de Teicelli, Bossut, e., página 168.
- 3.º Rozamiento interior de los líquidos—página 172.

§ I.—

Ley de Ma de los ga

§ II.—

Principio d

§ III.—

Cohesion d

§ IV.—

Difusion.

§ V.—

Disolucion

los líqui

§ VI.—

Oclusion d

§ VII.

Vena y co

sas.

Aplicaciones, pág. 173.

TRATADO ELEMENTAL DE FISICA

PRIMERA PARTE.

LIBRO I.

NOCIONES GENERALES.

INTRODUCCION.

Exponemos en el presente libro los conocimientos generales acerca de la materia, de los cuerpos, y de las propiedades de estos; algunas ideas sobre la energía y sus manifestaciones ó fuerzas naturales; y, finalmente, un ligero bosquejo de la constitucion material y dinámica de los cuerpos y del universo, y de los fenómenos que estudia la Física; en los cinco capítulos que comprende resaltan ciertos detalles ó hechos de que es necesario tener desde el principio alguna nocion, siquiera sea tan imperfecta como la que poseemos del peso de los cuerpos ó del calor, por ejemplo, ántes del estudio de los mismos.

Los alumnos notarán enseguida, que *la observacion* de la naturaleza y *la experimentacion* ó produccion artificial de hechos naturales son las fuentes casi exclusivas de conocimiento en

nuestra asignatura; así como *el cálculo* ó lenguaje matemático, y *las hipótesis* motivadas, racionales y consideradas en su verdadero valor, los dos preciosos instrumentos que emplea la Física para interpretar los hechos, relacionarlos y llegar por fin á la adquisición plena de la verdad.

Por tan seguras vías no es extraño que se haya remontado el hombre á los trascendentales descubrimientos é importantes aplicaciones que tanto interés y realce dan á la Física moderna.



CAPÍTULO I.

MATERIA Y ENERGÍA.

§ I.—MATERIA.*

1—A—Los sentidos, principalmente el del tacto, nos imponen con fuerza la idea de que existe un *algo real*, una esencia comun á todas las ^{cosas} ~~los~~ *cuerpos*, que los constituye, y es diferente del *sér que siente, quiere y piensa*; y la razon, por efecto de la observacion constante y universal, aunque tosca, de propiedades que se presentan en cuantos objetos nos rodean, es arrastrada á la creencia de que se halla en posesion de los caractéres peculiares y distintivos de dicha *realidad*.

Se da el nombre de *materia*, á ese *algo* ó sustancia de que están formados los cuerpos; y es opinion corriente asignarle la propiedad, entre otras, de tener extension.

* **B**—Pero ¿las impresiones de los sentidos, los hechos que estos acusan, y las inducciones á que se eleva la inteligencia sobre la base de la observacion, conducirán á la *verdad* ó al *error* respecto de la materia?

Es mucho más probable *lo segundo*, dado lo imperfecto, limitado y raquítico de los medios de que el hombre se halla dotado y dispone para abordar tan difícil cuestion; y por ello, y por otras consideraciones, admitiremos tan solo la materia como una realidad existente, sin prejuzgar nada sobre sus caractéres específicos y diferenciales, acerca de los cuales, si los tiene y son asequibles al entendimiento, profesamos la opinion de que se está en la más completa ignorancia.

2—A—Los cuerpos parecen ser acumulaciones ó modos de existencia de la materia, cuya desconocida razon de formacion radica en la esencia misma de dicha sustancia. El calor tiene una influencia indudable sobre muchas de estas formas, como lo demuestra la destruccion por el mismo de los cuerpos orgánicos; y el hecho de que el agua, unas veces corre líquida

por los arroyos, y otras aparece petrificada constituyendo duros témpanos; pero en definitiva no puede ser considerado sino como una causa modificadora de algunas de las formas que la materia afecta.

B—Los cuerpos impresionan nuestros sentidos á modo de porciones de materia claramente limitadas y aisladas entre sí; ya veremos sin embargo que en esta concepcion no hay exactitud completa; y que si bien es cómodo y hasta útil, y responde en cierto modo á la verdad, el considerar así á los cuerpos, hay indudablemente más analogía con la realidad sustituyendo la idea de la independenciam entre los objetos que nos rodean por la de la relacion que existe, por ejemplo, entre el trozo de hielo y el agua del lago en que flota.

3—A—Que la materia y los cuerpos que constituye aceptan diversidad de formas, es un hecho evidente de observacion vulgar; pero la experimentacion ha enseñado además que cualesquiera que sean los modos que los cuerpos afecten, la materia no parece variar en cantidad á través de sus evoluciones. Al arder una bujía puede creerse que desaparece la sustancia que la constituye; pero si la combustion se verifica en una vasija cerrada de donde no se escapen los productos de la misma, observaremos que el peso de la vasija es idéntico ántes y despues de la combustion; es decir que la materia ha variado de forma pero no de cantidad.

B—Este principio, generalizado al universo, se llama *ley de la conservacion de la materia*, y se enuncia diciendo que en la naturaleza *ni se crea materia ni se destruye*.

§ II.—ENERGÍA.

4—A—El universo no se presenta al observador como un edificio en que todo es fijo é invariable de forma, sino que, por el contrario, su aspecto está cambiando sin cesar de un momento á otro: estas perpétuas y contínuas variaciones se llaman *fenómenos*; y el estudio de los mismos ha evidenciado hasta la fecha que son pura y simplemente *movimientos* ó cambios de las posiciones relativas de los cuerpos, ó de las partes de estos, realizados sucesivamente.

* **B.**—Solo algunos fenómenos, como *el sentir*, propios del hombre y de los seres organizados en general, no han podido todavía ser asimilados al resto de los conocidos; por más que existan indiscutibles relaciones é influencias entre unos y otros.

5—A-a—Determinadas escuelas filosóficas, elevando sus hipótesis acerca de lo que sea la materia, á la categoría de verdades demostradas, suponen incapaz de toda actividad á la sustancia de los cuerpos y admiten una causa destinada á sacarla de su estado pasivo, ó sea á moverla, con existencia real, diferente de la materia, y susceptible de residir en ella en más ó ménos cantidad, y de obrar desde la misma y por su intermedio, y de pasar de unos á otros cuerpos; á ésta supuesta realidad se ha dado el nombre de *fuerza*.

b—Tal opinion vá sin embargo teniendo cada dia ménos favor entre los hombres de ciencia. El exámen atento de gran número de movimientos, ha puesto en claro que la causa de los mismos es la cesacion ó disminucion de otros movimientos anteriores; es decir, que *la causa del movimiento es la materia en movimiento*. Y como en la naturaleza nada hay supérfluo, parece razonable pensar que *la fuerza ó la materia en movimiento huelgan*, aún cuando existan actualmente, como hechos inexplicados, algunos movimientos cuyo origen (los movimientos de que son transformacion) no ha podido determinarse todavía.

B—Para nosotros, tanto la comunicacion, como el estado de movimiento, son hechos oscurísimos, definidos solo convencionalmente (1) y cuyo esclarecimiento es probable que nos pusiera en posesion de un concepto cabal de la materia. Rechazamos en absoluto la existencia de la entidad fuerza; por más que, al sentar que el movimiento de la materia es debido á la materia en movimiento, concedamos que no se hace en realidad sino relacionar los instantes anterior y posterior al fenómeno de la comunicacion del movimiento, señalando por medio de dos puntos el curso del hecho, que por lo demás continúa envuelto en el misterio. Pero emplearemos la pala-

(1) Se define el movimiento diciendo que es el cambio de posicion que experimenta un cuerpo en el espacio durante el tiempo. Pero el tiempo es una mera relacion, y muchos pensadores niegan la existencia real del espacio.

bra *fuerza*, ya que no como el nombre de ninguna entidad, á modo de frase abreviada, ó símbolo de un fenómeno no explicado, cuya frecuencia hasta haría embarazoso el lenguaje, si cada vez que tuviéramos necesidad de referirnos al mismo hubiésemos de apelar á los largos rodeos de expresion que serian indispensables, de no adoptar una palabra de significacion convenida para representarlo. Así cuando digamos *fuerza de atraccion, fuerza del vapor*, etc., no haremos sino dar nombre á la trasformacion misteriosa de movimientos desconocidos en otros sensibles cuyo resultado es acercarse los cuerpos, en el primer caso; y á la misma produccion de movimientos visibles á expensas del invisible que agita el vapor de agua en la caldera de una locomotora, en el segundo.

C-a—La existencia de fuerzas *atractivas* y *repulsivas* (términos que excusamos definir), no es obstáculo que se oponga á la negacion de la fuerza; pues tal distincion puede ser tan aparente como hipotética la concepcion de la misma fuerza, y en todo ello no hay necesidad de ver otra cosa que el importante papel de la imaginacion en las ciencias naturales. Un corcho que sumergimos hasta el fondo de una vasija con agua, se eleva tan pronto como queda libre, cual si le impulsara una fuerza repulsiva residente en el fondo del vaso ó una fuerza atractiva propia de la superficie del líquido; y sin embargo estamos bien ciertos de la no existenciá de tales fuerzas, atractiva ni repulsiva.

* **b**—La Mecánica corrobora la opinion de que nos declaramos partidarios: pues si bien dicha ciencia necesita, en mayor grado aun que la Física, simplificar el planteamiento de sus problemas mediante la ficcion de la entidad fuerza, ha logrado establecer dos fórmulas (Mec.) preciosas que pueden considerarse como expresion del concepto de fuerza en la realidad de los hechos (masas que se mueven con cierta velocidad) bajo el aspecto del tiempo y del espacio, ó sea de los dos elementos del movimiento (única fuente á que atribuimos todo movimiento).

(1) $Ft = mv$; impulsion igual á cantidad de movimiento.

(2) $Fe = \frac{1}{2}mv^2$; trabajo igual á fuerza viva.

Son las dos fórmulas á que aludimos: la primera establece que *el valor de una fuerza en cada instante, ó sea la impulsion en un segundo, está medida por la cantidad de movimiento determinada en*

las masas sobre que actúa; y la segunda, que dicho *valor en la unidad de espacio*, ó sea el trabajo de trasladar la fuerza un centímetro, *es la energía dinámica, fuerza viva*, ó capacidad para efectuar trabajo, *de la masa en movimiento*. Los productos mv y $\frac{1}{2}mv^2$ son, pues, verdaderas representaciones del significado de la palabra fuerza.

6—A-a—Establecido el concepto de fuerza, vamos á dejar sentadas con claridad las ideas mecánicas dentro de las cuales buscaremos la interpretacion de los fenómenos objeto de nuestro estudio.

b—Las fuerzas no siempre se manifiestan por sus efectos ó movimientos; sino que cuando dos ó más actúan sobre una masa, pueden constituir (Mec.) un sistema en equilibrio, es decir, un sistema en que, neutralizándose unas con otras, no llegan á determinar el movimiento del cuerpo sobre que obran, por más que tampoco pierdan la facultad de producirlo, como se comprueba fácilmente suprimiendo una de las fuerzas del sistema.

c—Las fuerzas, pues, pueden existir en dos estados ó modos; ó produciendo movimientos efectivos, ó tendiendo tan solo á producirlos: á las de la primera especie se las llama *fuerzas vivas, energías dinámicas ó actuales ó energías en accion*; á las de la segunda, *fuerzas muertas ó de tension, ó energías virtuales ó potenciales ó en reserva*.

B—La observacion enseña que continuamente se están verificando transformaciones de energía dinámica en potencial, y viceversa; con la circunstancia notable de que en tales evoluciones la fuerza muerta creada es igual á la viva consumida, y, al contrario, la energía actual que aparece corresponde á una cantidad igual de energía potencial desaparecida; es decir que la energía se transforma, y en cada caso *la suma de la potencial y la dinámica permanece invariable*.

Esta importante verdad se llama *principio de la conservacion de la energía*.

C-a—El movimiento de un reloj de pesas es uno de los ejemplos más sencillos en que puede comprobarse la realizacion de la ley acabada de enunciar.

Para dar cuerda á uno de estos relojes tan comunes hay necesidad de *subir la pesa*, ó sea de emplear cierta cantidad de fuer-

za viva ó energía dinámica que dicha *masa al elevarse* almacena en estado de energía potencial. Si el descenso de la pesa se verificase instantáneamente, gastaría en un momento la fuerza viva que se le comunicó durante la elevacion; pero estorbada en su caída por el mecanismo del reloj, baja despacio y no restituye sino poco á poco en el trascurso de algunas horas la fuerza viva que tenia absorbida. Donde vemos: 1.º que en el momento de subir la pesa y cuando el reloj está dispuesto á marchar, toda la fuerza viva empleada se encuentra en estado de fuerza muerta, tension ó energía potencial; su accion se deja sentir por una especie de presion sobre los engranajes de la máquina: 2.º que en cualquier momento del descenso, la suma de la fuerza viva gastada y la potencial que aun conserva la pesa sin transformar en actual es una cantidad constante é igual á toda la fuerza empleada para elevar la pesa: 3.º que cuando la pesa llega al final de su caída ha aparecido toda la fuerza viva que se la comunicó al subir y almacenó bajo la forma de energía potencial; y como además la ha gastado, el reloj se para.

En este, pues, como en cualquier caso, la suma de las energías dinámica y potencial, es siempre constante; á dicha suma se la llama *energía total*.

b—La *energía total* representa el verdadero concepto de la palabra *energía*; y esta, por consiguiente, se compone de dos cantidades; la energía dinámica, que no es otra cosa que la fuerza viva especial á las masas en movimiento y susceptible de consumirse en trabajos ulteriores; y la energía potencial, ó fuerza viva ya transformada en trabajos realizados y almacenada, por decirlo así, en las masas, aun cuando se hallen en reposo.

Conviene observar que el trabajo supone el acto consumado, miéntras que la fuerza viva es solo la capacidad de realizar un trabajo equivalente; pero que en definitiva el trabajo es un término de comparacion para los dos sumandos de la energía.

* **c**—Admitido el principio de la conservacion de la energía es natural preguntarse el *fin* de la fuerza viva que aparece y se gasta durante el descenso de la pesa, toda vez que su origen es la transformacion de la energía potencial en actual.

Observando que dicha fuerza viva se emplea, tanto en poner en movimiento el reloj como en vencer el rozamiento entre los engranajes de las ruedas dentadas, la resistencia del aire al movimiento de la péndola etcétera (cuyas acciones son manantiales de calor, es decir, origen de otra fuerza física), queda contestada la pregunta: pues si fuera posible recoger todos estos efectos bajo la forma térmica y transformarlos al modo como lo hace una locomotora, encontraríamos que representan exactamente la fuerza necesaria para volver á elevar la pesa á la altura desde donde empezó su descenso.

Vemos por consiguiente que no hay creación ni destrucción de energía, sino transformación y conservación.

* 7—El principio de la conservación de la energía puede representarse con toda generalidad por una expresión matemática sumamente sencilla.

Sea F el peso de la masa motora del reloj, y E la altura á que se le eleva al dar cuerda: el producto FE (5—C—b⁽²⁾) (el trabajo realizado para hacer recorrer á la fuerza F el espacio E) representa la fuerza viva comunicada á la masa, ó sea $\frac{1}{2} m V^2$, llamado m á la masa de la pesa y V á la velocidad con que subió.

En un instante cualquiera del descenso sea e el camino recorrido por la pesa con una velocidad v , y Fe por consiguiente la medida de la cantidad de energía dinámica aparecida y gastada: llamando r á la energía potencial que aun conserva la masa, tendremos

$$Fe+r=FE \quad \text{ó bien} \quad \frac{mv^2}{2}+r=\frac{mV^2}{2}$$

es decir que *la fuerza viva ya gastada más la fuerza potencial existente es igual á la fuerza viva primitivamente comunicada al sistema*. Y como en cada caso particular mV^2 es una constante, designándola por C tendremos finalmente

$$\frac{mv^2}{2}+r=C$$

Si en vez de un simple reloj consideramos el conjunto de todas las fuerzas que obran en el universo, ó sean las masas $m, m', m'', m'''\dots$ animadas de las velocidades $v, v', v'', v'''\dots$ y poseyendo además las energías potenciales $r, r', r'', r'''\dots$ es fácil establecer la ecuación

$$\left(\frac{mv^2}{2} + \frac{m'v'^2}{2} + \frac{m''v''^2}{2} + \frac{m'''v'''^2}{2} + \dots\right) + \left(r+r'+r''+r'''+\dots\right) = C$$

ó lo que es lo mismo, *la suma de toda la energía dinámica del mundo con la de toda la energía potencial existente en cualquier momento es*

invariable en el trascurso del tiempo. Es decir que en el universo la energía, como la materia, ni se crea ni se destruye, sino que su cantidad permanece constante á través de transformaciones múltiples.

8—A-a—¿Qué es la energía? ¿Qué relacion existe entre ella y la materia? ¿Son una misma cosa? ¿O cosas diferentes? ¿Es la energía una potencia de la materia al modo como se concibe que la inteligencia lo es del alma humana?

b—Problemas son estos de difícil solucion en el estado actual de nuestros conocimientos; la ley de la conservacion de la materia y la de la conservacion de la fuerza no parecen en definitiva sino la expresion de un mismo principio considerado bajo dos aspectos: la materia no se nos manifiesta sino por las fuerzas que en ella y desde ella evolucionan; y la sustancia de los cuerpos privada de energía, es decir sin movimiento, como la fuerza existiendo fuera de la materia, son abstracciones que no responden á la realidad. Desde el momento, pues, en que la materia no es sino el *substratum* de las fuerzas naturales, la indestructibilidad de la materia y de la energía son dos principios inseparables uno de otro. Y esto es todo lo que se sabe.

B—Nótese, sin embargo, que tales consideraciones, léjos de facilitar el planteamiento de los problemas enunciados en el presente número (**A-a**), solo tienden á destruir ciertas ideas que pasan por verdades indiscutibles para muchas escuelas filosóficas.

Nada más corriente, por ejemplo, que decir: la *materia es inerte*; entendiendo por *inercia*, como propiedad característica de la sustancia de los cuerpos, la incapacidad para darse esta á sí misma movimiento ó para quitárselo, (afirmacion gratuita que nos supone en posesion del mecanismo secreto de la comunicacion del movimiento); ó bien la imposibilidad de que la materia, considerada en reposo, salga de tal estado sino es por la accion de una causa exterior á ella (concepcion que saca las cosas totalmente de la realidad).

Pero observa con gran sagacidad á este propósito el señor Freycinet, que lo único que se sabe de cierto sobre el particular (Mec.) es que *cuando las fuerzas que solicitan un cuerpo dejan de obrar sobre él, el movimiento continúa segun una linea recta tangente á la trayectoria que la masa venia describiendo, y con una velocidad constante igual á la que el cuerpo poseia en el momento que cesaron las fuerzas.*

Y, realmente, este hecho es una consecuencia necesaria de la ley de la conservación de la energía; verdad de segundo orden, en suma, que no debe servir en buena lógica para la fundación de nada primordial referente á la materia, como la concepción hipotética de la propiedad característica de la sustancia de los cuerpos á que llaman *inercia* las escuelas partidarias de este modo de ver.

9—Lo único, en resúmen, que podemos dejar establecido en virtud de cuanto llevamos dicho, es que allí donde hay *movimientos y comunicaciones y transformaciones de estos, allí están la materia y la energía*, sean cuales fueren las apariencias que los sentidos den á tales fenómenos, ó las dificultades experimentales en que se estrelle la comprobación de tal principio.

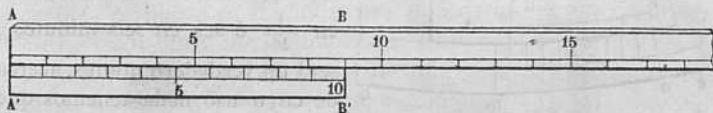
*—**10—A**—La circunstancia de ser los fenómenos meras apariencias de los movimientos que se realizan (**4—A**) en el universo, da una importancia capital á la medida del espacio y del tiempo.

Y aunque la ocasion y aun el tratado presentes no sean á propósito para describir todos los aparatos inventados al objeto de medir con exactitud distancias é intervalos de tiempo, tampoco está completamente fuera de lugar, y aparte de esto es conveniente, dar á conocer algunos de los más usuales en los gabinetes de Física, como el *nonius* ó *vernier*, el *catetómetro*, el *esferómetro* y el *cronómetro de segundos*.

B-a—Las reglas que se emplean generalmente para medir la distancia entre dos puntos pueden ser divididas con exactitud en centímetros y milímetros; pero la división del milímetro en partes ofrece dificultades, y con objeto de excusarla y de poder sin embargo apreciar fracciones del mismo ó de cualquier otra unidad pequeña, se ha inventado el *nonius* por el geómetra español Nuñez.

Para comprender el principio de este aparato supongamos una regla AB (Fig. 1) dividida en centímetros: á su lado coloquemos otra A'B' de 9 centímetros de longitud dividida en 10 partes, que es el

Fig. 1.



nonius: cada una de estas diez divisiones representará $\frac{9}{10}$ de centímetro, y como el centímetro vale $\frac{10}{10}$, la diferencia entre las divisiones

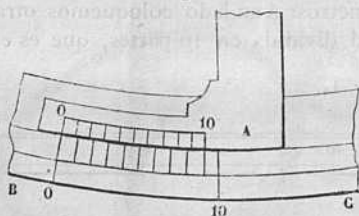
de la regla y del *nonius* será $\frac{1}{10}$ de centímetro, ó sea un milímetro; de manera que si suponemos en coincidencia, como indica la figura, las rayas 0 de ambas reglas, las 1 estarán separadas 1 milímetro; las 2 distarán 2, y así sucesivamente.

Esto sentado expliquemos en un caso práctico el uso del *nonius*; se trata, por ejemplo, de medir la longitud de una barra que tiene más de 52 centímetros, y ménos de 53: coloquemos cuidadosamente el cero del metro en un extremo de la barra, y apliquemos el *nonius* al otro extremo de la misma: observando las divisiones de ambas reglas, supongamos que la 7 de la segunda coincide exacta ó muy aproximadamente con una de la primera; partiendo desde dicha division 7 hacia la barra, la primera raya del metro está separada, como ántes hemos visto, 1 milímetro de la seis del *nonius*; la segunda habrá adelantado á la cinco en 2 milímetros; la tercera á la cuatro en 3, y la sétima, ó sea el centímetro 52, se encontrará 7 milímetros más avanzada que el cero del *nonius*; pero como ésta diferencia es precisamente lo que la barra pasa de 52 centímetros, resultará en definitiva medida la longitud de la misma en centímetros (52) y milímetros (7).

Si el *nonius* tiene 9 milímetros y está dividido en 10 partes, apreciará, por consiguiente, $\frac{1}{10}$ de milímetro ó sea en diezmilímetros; y si su longitud es 19 milímetros y está dividido en 20 partes (lo que es frecuente), medirá con un error menor que un $\frac{1}{20}$ ($\frac{20}{20} - \frac{19}{20}$) de milímetro, ó sea en *medios* diezmilímetros.

b—El *nonius* es también aplicable á la medida de pequeñas fracciones de arcos de circunferencia. Sea BC (Fig. 2) un trozo de cuadrante dividido en grados; un arco A móvil, de 9.º, que tiene el mismo centro del cuadrante, y está dividido en 10 partes (cada una de las cuales valdrá $\frac{9}{10}$ de grado, y se diferenciará del grado en $\frac{1}{10}$ ó sea en seis minutos), será un verdadero *nonius*, acerca de cuyo uso nada tenemos que añadir á lo ántes dicho (B-a).

Fig. 2.



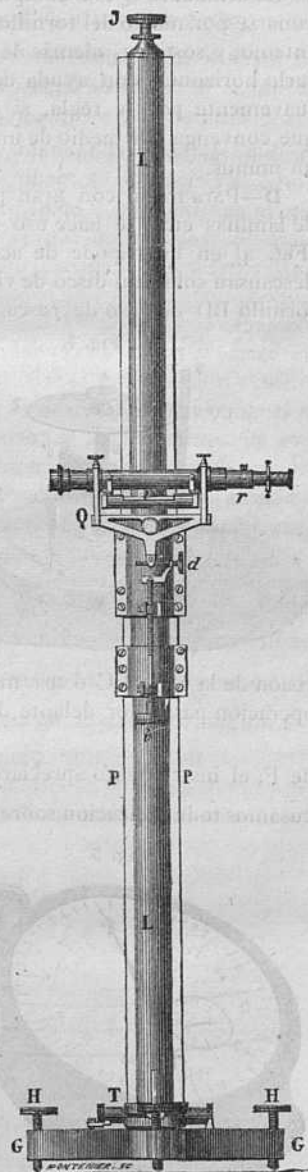
Si el arco-*nonius* poseyese una abertura de 59 minutos y estuviera dividido en 60 partes, el aparato apreciaría $\frac{1}{60}$ de minuto ó sea 1 segundo.

C—El *catetómetro* es un instrumento destinado á medir diferencias de altura, ó sean longitudes verticales que no pasen de 1,30m., (dimension máxima que suele darse al aparato); pero, ligeramente modificado, podría servir para medir distancias horizontales ú oblicuas.

Se compone (Fig. 3) de una regla LL, PP vertical, dividida en centímetros y milímetros, á lo largo de la cual puede correr un anteojo horizontal Qr provisto de retículo. La operacion de medir está reducida á colocar el anteojo en dos posiciones tales que desde cada una de ellas se dirija una visual á uno de los extremos de la distancia cuya longitud se quiere conocer, y la diferencia de alturas del mismo marcará en la regla la medida en cuestion.

La pieza LL, que descansa perpendicularmente sobre un pié de fundicion GG provisto de tres tornillos H y uno ó varios niveles T para colocarlo horizontal, se compone de dos partes; una interior de hierro, muy bien trabajada, que puede girar dentro de la base GG del aparato, y otra exterior de cobre superpuesta á la de hierro de modo que ambas forman un todo móvil alrededor de su eje vertical, pero susceptible de fijarse en cualquier momento de su giro por medio de un tornillo situado en el pié. Dos gruesas láminas P y P regladas con el mayor esmero sobresalen diametralmente, y en una de ellas van marcados los centímetros y milímetros.

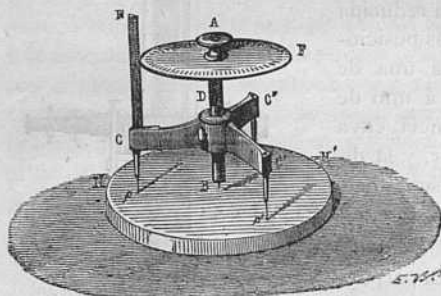
Fig. 3.



La armadura Q está compuesta de dos cuerpos que pueden aproximarse por medio del tornillo *b* con objeto de afinar la posición del anteojo; y sostiene, además de este instrumento, un nivel para colocarlo horizontal con ayuda del tornillo *d*; dicha armadura desliza suavemente por la regla, si bien puede ser detenida á la altura que convenga por medio de un tornillo de presión, y arrastra consigo un nonius.

D—Para medir con gran precisión pequeños espesores (gruesos de láminas etc.) se hace uso del *esferómetro*; aparato que consiste (Fig. 4) en un trípode de acero CC'C", cuyos aguzados piés *p*, *p'* descansan sobre un disco de vidrio esmerilado; va atravesado por un tornillo BD de paso de rosca de medio milímetro, y sostiene una

Fig. 4.

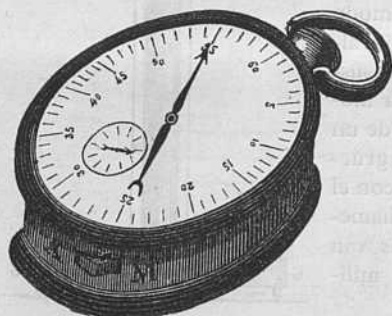


regla EC dividida en medios milímetros: el tornillo BD termina inferiormente en punta, y lleva por arriba un disco circular F dividido en 500 partes y la cabeza A para hacerle girar. Es claro que por cada vuelta del tornillo micrométrico BD correrá el disco F una di-

vision de la regla EC ó sea medio milímetro; pero como durante la operacion pasan por delante del medio milímetro las 500 divisiones

de F, el instrumento apreciará $\frac{1}{500}$ ó sea $\frac{1}{1000}$ de milímetro. Excusamos toda indicacion sobre el manejo de este sencillo instrumento.

Fig. 5.



E—El *cronómetro de segundos* es uno de los aparatos empleados en los laboratorios de Física para medir el tiempo: su mecanismo (Fig. 5) no difiere esencialmente del de un reloj de bolsillo; el limbo está dividido en 60 segundos, y otra aguja más pequeña avanza una division, ó sea un minuto, de su círculo correspondiente por cada vuelta de la aguja mayor. La pequeña

pieza A M permite detener ó poner en marcha el cronómetro sin más que hacerla correr ligeramente hácia A ó hácia M.

El espacio que representa cada segundo suele estar dividido en cuatro ó cinco partes, y aun se construyen algunos de estos cronómetros que aprecian $\frac{1}{50}$ y $\frac{1}{60}$ de segundo.

Conociendo la posición de las agujas, dejándolas marchar durante el intervalo de tiempo que se quiere medir y observando la posición en que quedan, se obtiene con facilidad la valoración de dicho tiempo.



CAPÍTULO II.

FORMAS DE LA MATERIA Y DE LA ENERGÍA.

§ I.—FORMAS DE LA MATERIA.

11—A-a—La observacion de la naturaleza enseña que al manifestarse la materia como cuerpos puede afectar formas muy variadas, que clasificaremos para su estudio en dos grupos: las *formas químicas, elementales ó de naturaleza íntima* (sustancias simples y compuestas), caracterizadas por su extrema pequeñez y por la persistencia más ó ménos absoluta en las mismas de propiedades tan diferentes que inducen á admitir la existencia de *varias materias*; y las *formas físicas, de conjunto ó de aspecto* (llamadas generalmente estados de los cuerpos, en razon á que muchos de ellos aceptan dos ó más), que vienen á ser modos de presentarse la materia constituida en cuerpos de cualquier forma química ó elemental.

* **b**—Mientras la materia, en virtud de evolucion ó como quiera que fuere, no se resuelve en cuerpos, es decir, en masas con las apariencias de extensiones compuestas de moléculas á distancia relacionadas por fuerzas, no hay formas físicas. Y las formas químicas deben buscarse en esas particillas cuya agrupacion produce las formas físicas.

¿Cuáles formas son anteriores? ¿O coexisten ambas? A estas preguntas no es posible, hoy por hoy, dar contestacion; pues admitiendo la forma etérea como límite científico de nuestros conocimientos en punto á formas de la materia, las particillas del éter pueden ser iguales, y este el punto de partida de las formas químicas, que en los cuerpos que originan ofrecen las físicas; pero con tanto fundamento cabe suponer al éter compatible con las formas químicas; ó, lo que es lo mismo, que muchos cuerpos simples son susceptibles de existir, y existen acaso, en el estado etéreo, más allá del cual cuanto se intente establecer es puramente dentro del orden metafísico.

Observemos que cualquiera de ambas hipótesis autoriza casi igualmente á considerar al éter como forma física de la materia, que es el carácter con que lo admitiremos.

12—A-a—El estudio de las formas químicas de la materia revela la existencia de algunas tan estables, que sometidos los cuerpos por ellas constituidos á la acción del calor y de las demás fuerzas en el máximo grado hasta ahora posible, constantemente ofrecen cierto conjunto de propiedades características y diferenciales; habiéndose convenido en llamar *simples* á estas formas (no como afirmacion de que lo sean, sino como expresion de que lo parecen ó se vienen conduciendo como si lo fueran), y *cuerpos simples* á los originados por las mismas.

b—Por el contrario, la inmensa mayoría de las formas químicas es tan inestable, que sometiendo los cuerpos constituidos por ellas á la acción del calor, se descomponen finalmente en dos ó más simples. Estas formas elementales se llaman *compuestas*: y cuerpos *compuestos*, los originados por tales elementos químicos.

c—En la primera columna del siguiente cuadro están consignados los nombres de la mayor parte de los cuerpos simples estudiados.

Cuerpos simples.	Equivalentes.	Pesos atómicos.	Pesos moleculares	Pesos específicos.	Volúmenes atómicos.
Hidrógeno.	1	1	2	a. 0,069	14,49
Fluor.	19	19	"	"	"
Cloro.	35,46	35,5	71	a. 2,44	14,79
Bromo.	80	80	160	3,187	25,16
Iodo.	126,8	126,8	254	4,498	28,19
Oxígeno.	8	16	32	a. 1,105	14,54
Azufre.	16	32	64	1,98	16,16
Selenio.	39,4	78,8	"	4,46 á 4,5	17,51
Teluro.	64,1	128,2	"	6,258	20,67
Nitrógeno	14	14	28	a. 0,971	14,30
Fósforo.	31	31	62	1,83	16,94
Arsénico.	75	75	"	5,75	13,04
Antimonio	120,6	120,6	"	6,7 á 6,8	17,73
Bismuto.	208	208	208	9,75 á 9,8	"
Vanadio.	68,50	137,1	"	"	"
Niobio.	47	94	"	"	"
Tantaló.	91	182	"	"	"
Boro.	11	11	"	2,68	"
Oro.	98,3	196,6	"	19,25 á 19,33	"
Carbono.	6	12	12	1,3 á 3,55	"
Silicio.	28,5	28,5	"	2,46 á 4,5	"
Titano.	24	48	"	"	"
Zirconio.	45	90	"	4,15	"
Estaño.	58,8	117,6	118	7,28 á 7,29	"
Torinio	115	230	"	"	"

Cuerpos simples.	Equi- valentés.	Pesos atómicos.	Pesos moleculares	Pesos específicos.	Volúmenes atómicos.
Molibdeno.	46	92	>	8,611	>
Tungsteno	92	184	>	18,1	>
Litio.	7	7	>	0,59	11,9
Sodio	23	23	>	0,972	23,66
Potasio	39,1	39,1	>	0,865	45,20
Rubidio	85,4	85,4	>	>	>
Cesio.	133	133	>	>	>
Plata.	107,9	107,9	>	10,47 á 10,54	10,37
Talio.	204	204	>	11,862	17,20
Calcio.	20	40	>	1,55	26,66
Estroncio	43,81	87,6	>	2,54	35,04
Bario.	68,50	137	>	4,1	33,41
Glucinio	4,7	9,4	>	>	>
Itrio	31,50	63	>	>	>
Erbio	56,3	112,6	>	>	>
Terbio.	>	>	>	>	>
Galio.	35	70	70	>	>
Cerio.	46	92	>	>	>
Lantano.	46	92	>	>	>
Didimo	48	96	>	>	>
Magnesio	12	24	>	1,75	>
Zinc.	32,5	65	>	6,86 á 7,2	>
Cadmio	56	112	>	8,6 á 8,69	>
Cobre	31,7	63,4	>	8,91 á 8,95	>
Mercurio	100	200	200	13,596	>
Plomo	103,50	207	207	11,35 á 11,44	>
Rodio	52,2	104,4	>	11	9,45
Rutenio.	52,2	104,4	>	11,3	9,22
Paladio	53	106	>	11,3	9,38
Platino	98,6	197,2	>	21,15 á 21,7	9,34
Iridio.	98,6	197,2	>	21,15	9,34
Osmio.	99,5	199	>	21,3	9,34
Aluminio.	13,7	27,4	>	2,5 á 2,67	10,96
Cromo.	26,2	52,4	>	6 á 6,8	8,73
Manganeso	27,60	55,2	>	7,14 á 7,2	7,77
Hierro.	28	56	>	7,25 á 7,9	7,77
Niquel.	29,4	58,8	>	8,28 á 8,82	7,17
Cobalto	29,4	58,8	>	8,68	6,77
Indio	56,7	113,4	>	>	>
Urano	60	120	>	18,4	>

d—El número de los cuerpos compuestos conocidos es considerable; y su nomenclatura, ó conjunto de reglas para darles nombre, así como el estudio de los mismos constituyen partes de los tratados de Química.

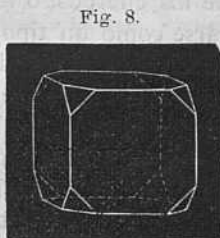
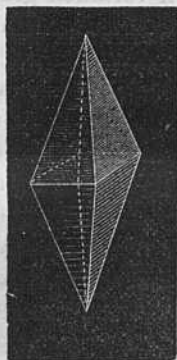
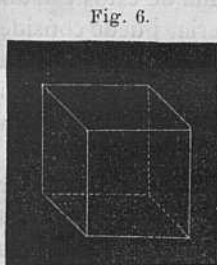
13—A—La observacion de las formas físicas ó de conjunto que la materia afecta permite clasificarlas en dos grupos: *formas ponderables*, llamadas así porque los cuerpos que las ofrecen pueden pesarse; y *formas imponderables*, conocidas con el nombre de *éter* ó *materia etérea*, en las cuales no se ha comprobado aun la existencia ó falta de peso.

B-a—Las formas ponderables se designan comunmente con el nombre de *estados de los cuerpos*, y pueden reducirse á

cinco tipos: *sólido, líquido, gaseoso ó de vapor, pastoso ó viscoso y líquido-gaseoso*. Algunos añaden el *radiante*.

b—En el estado sólido el volúmen y la forma de los cuerpos son persistentes, ó cuando ménos es preciso emplear esfuerzos ó energías considerables para alterarlos: los cuerpos

Fig. 7.



Ejemplos de formas cristalinas.

en este estado ofrecen una tendencia notable á tomar espontáneamente *formas geométricas* llamadas *cristales*: ejemplos, la madera, el plomo, el azúcar, la pirita de hierro, etc.

c—En el estado líquido el volúmen ocupado por el cuerpo es constante, ó al ménos hay que emplear cantidades de energía notables para variarlo; pero la forma cambia fácilmente: por esto vemos á los líquidos adaptarse á la configuración interna del vaso que los contiene: ejemplos, el agua, el alcohol, etc.

d—Los cuerpos en estado gaseoso tienen la propiedad de aumentar de volúmen y variar de forma en grado tal, que llenan siempre la vasija en que se les encierra, aunque sea muy grande: ejemplos, el aire, el cloro, el hidrógeno, etc.

e—El estado pastoso ó viscoso es intermedio entre el líquido y el sólido, y participa más de uno ó de otro segun los cuerpos en que se presenta: ejemplos, la pez, la cera caliente, etcétera.

f—Los cuerpos en el estado líquido-gaseoso, intermedio entre los dos que su denominacion indica, poseen

cierto aspecto de líquidos y la facilidad de variar de volúmen que caracteriza á los gases; se observa calentando los líquidos en vasijas cerradas, ó reduciendo los gases mucho de volúmen por medio de enérgicos esfuerzos.

g—Crookes llama *materia radiante* al estado que supone adquieren los gases cuando una pequeña cantidad de alguno de ellos ocupa un volúmen grandísimo: pero nosotros consideramos improbable la existencia de tal estado, y, sobre todo, poco ó nada justificada.

h—No perdamos de vista que cada uno de estos estados de los cuerpos, ó formas físicas de la materia, puede considerarse como un tipo, segun arriba indicamos, dentro del cual cabe cierta variedad; la observacion más rudimentaria enseña, en efecto, desde luego, que ni todos los sólidos lo son en igual grado, ni todos los líquidos igualmente fluidos, etc.

C—De las formas *físicas imponderables*, ó sea del éter, apenas se tiene otro conocimiento que el de su existencia; fundados en lo establecido en el capítulo anterior (9), al observar que de unos á otros astros hay comunicaciones de movimiento, cambios de energía idénticos á los que se verifican, tambien sin intermedio de la materia ponderable, entre las formas químicas y físicas ponderables en la superficie de la tierra, se llega á la consecuencia necesaria de que los espacios están llenos de materia tan sumamente sutil que indudablemente impregna el interior de los cuerpos como el aire baña una esponja.

Más adelante veremos que la experimentacion acusa algunas diferencias en la materia etérea segun el paraje donde se la estudie; pero, en definitiva, ni las propiedades á esta forma física reconocidas, ni las alteraciones, hasta ahora observadas, de las mismas, son guías suficientes para penetrar en el misterio que, bajo el punto de vista de las formas de la materia, puede encerrar la palabra éter.

§ II.—FORMAS DE LA ENERGÍA.

14—A—Bien sea como consecuencia de los procesos naturales que han dado origen á las formas físicas y químicas de la ma-

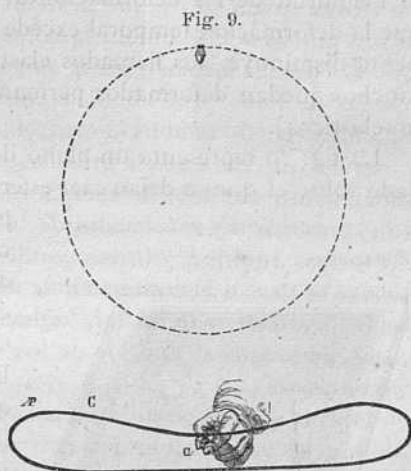
teria, ó por la reparticion no homogénea de esta en el universo; ó por otras causas ni aun sospechadas, los cuerpos se presentan al observador como residencias de energías varias, con frecuencia en estado potencial, que dan lugar á la creacion de caractéres y á la produccion de fenómenos extremadamente importantes.

No siendo fácil una clasificacion de estas formas de la energía, nos limitaremos á hacer una ligera mencion de las principales.

B-a—*Elasticidad* es la fuerza en virtud de la cual los cuerpos tienden á conservar su volúmen y forma, recobrándolos cuando se les hace sufrir alguna deformacion: se llama tambien *fuerza de resorte*, y puede obrar de distintos modos segun los casos; así, cuando estiramos un cordón de goma, la elasticidad aparece como una fuerza interior atractiva cuyo efecto, dejándose sentir del uno al otro extremo del hilo, tiende á encojerlo, y lo acorta de hecho reduciéndolo á su longitud primitiva, en cuanto cesa el esfuerzo tractor; y por el contrario, cuando comprimimos un líquido en una vasija, la elasticidad

obra como una fuerza repulsiva interna en virtud de la cual el cuerpo recobra su volúmen tan pronto como deja de ser comprimido. La (Fig. 9) representa un experimento de elasticidad.

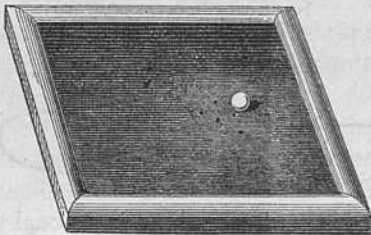
Esta energía se observa en todas las formas físicas de la materia (sin exceptuar la etérea); pero reviste caractéres algun tanto diferentes segun los casos: los líquidos y los gases son considerados como perfectamente elásticos dentro de los límites de la experimentacion, admitiéndose por lo tanto que siempre recobran su volúmen y forma, cualquiera que sea la magnitud de la deformacion: al éter se le supone elástico en



absoluto, ó en el más alto grado posible: los cuerpos sólidos no recobran generalmente su volúmen y forma, sino que subsiste una parte de la deformacion, llamada *permanente*, si quiera sea mínima en muchos casos. De esta circunstancia especial tomó origen una clasificacion de los sólidos en *elásticos* como el marfil, el acero, etc., y *no elásticos* como el plomo, cuyo verdadero fundamento es la desigualdad de las deformaciones temporal y permanente que en igualdad de circunstancias ofrecen dichos cuerpos. Cuando las deformaciones son pequeñas todos los sólidos manifiestan una elasticidad que puede considerarse tan perfecta como la de los líquidos, en atencion á lo insignificante de la deformacion permanente; pero á medida que se intenta ensayar la elasticidad aumentando la magnitud de las deformaciones, el número de sólidos en que la deformacion temporal excede notablemente á la permanente disminuye (los llamados *elásticos*), y por el contrario, muchos quedan deformados permanentemente (los supuestos no *elásticos*).

La fig. 10 representa un plano de mármol negro y empolvado sobre el que se dejan caer esferas de marfil, de plomo, y

Fig. 10.



perdigones de esta sustancia. La deformacion producida en el momento de ¹choque aparece constantemente indicada por una huella circular en el polvo que cubre al mármol; pero la esfera de marfil recobra instantáneamente su forma despues del choque, al paso que la de plomo queda aplastada si es grande, y se conduce como el marfil si no pasa del tamaño de un perdigon.

Estos hechos demuestran además que la elasticidad es una fuerza que varía con la distancia representada por la magnitud de la deformacion.

La *compresion*, es el procedimiento general para producir deformaciones en todas las formas físicas de la materia; pero los sólidos pueden además ser deformados por *traccion* (esti-

rándolos), por *torsion* (retorciéndolos) y por *flexion* (doblándolos).

Claro es que mientras no se produce la deformacion, la energía elástica es una mera potencia de los cuerpos.

La elasticidad de cada cuerpo varía bajo la influencia de circunstancias varias, como el calor, etc.

b—*Afinidad* es una fuerza propia de las formas químicas de la materia, que determina la produccion de cuerpos compuestos con los simples, y aun con otros compuestos.

No se conoce ningun cuerpo simple desprovisto de afinidad; pero apreciada ésta por la facilidad que cada uno ofrece de combinarse con los restantes, por el número de compuestos que forma, ó por la estabilidad de los mismos, presenta un marcado carácter electivo; el oxígeno, por ejemplo, tiene más afinidad con el potasio que con el plomo y con este más que con el oro; lo que generalmente se significa diciendo *afinidades* y no *afinidad* de cada cuerpo.

Mientras no se ponen los cuerpos en contacto muy íntimo, la afinidad reviste la forma de energía potencial; pero cuando dicho contacto se verifica, el fenómeno de la *reaccion química* ó manifestacion efectiva de la afinidad, se presenta, produciéndose *la combinacion* ó formacion de cuerpos compuestos. Por esta razon los cuerpos reaccionan más fácil y seguramente unos sobre otros en el estado líquido que en el sólido. El valor de la afinidad está, pues, relacionado con la distancia.

Circunstancias varias, como el calor, influyen sobre las afinidades mútuas de los cuerpos; pero el estudio de esta fuerza, de sus modificadores, de los cuerpos que origina y de las propiedades de los mismos constituye la rama de las ciencias naturales llamada Química.

c—*Atraccion universal* es una fuerza observada entre todas las formas ponderables físicas y químicas de la materia, en virtud de la cual los cuerpos en presencia, cualquiera que sea la distancia que los separe, tienden á precipitarse unos sobre otros. Considerada entre los astros, se llama *gravitacion*; y entre la Tierra y los cuerpos situados en su superficie, *gravedad*.

El fenómeno de la caida de los cuerpos es, pues, una manifestacion de la atraccion; y la universalidad de ésta se eviden-

cia por el hecho de poderse realizar con cuerpos cualesquiera el siguiente experimento: se suspende por medio de un hilo flexible un cuerpo pequeño, como un perdigon; se acerca al mismo otro que pese algunos cientos de kilogramos, y la desviacion del pequeño hácia el grande se hace perceptible en cuanto la distancia entre ambos es poco considerable. A su vez este perdigon es capaz de atraer á otro mucho más pequeño.

Vemos, por consiguiente, que el valor de la fuerza de atraccion *aumenta* en proporcion *con la cantidad de materia*, y, como el de las otras fuerzas naturales, *varía con la distancia*.

De este experimento podria deducirse que los cuerpos no se atraen mútuamente á todas distancias; pero debe tenerse en cuenta, como en el caso de la gravedad, que el cuerpo mayor se mueve mucho ménos que el otro, en razon á la menor atraccion de éste, por lo cual, cuando la diferencia es muy notable, sólo se observa el movimiento del último; y que si bien los cuerpos se atraen en todas sus posiciones, como el valor de la fuerza disminuye á medida que están más separados, sus efectos solo se hacen apreciables á los sentidos desde cierta distancia.

Es notabilísima la circunstancia de que la cantidad de atraccion que podemos asignar, por decirlo así, á cada cuerpo, dependa exclusivamente de la cantidad de materia del mismo, y no de su forma física y química; hecho complementado con el interesante fenómeno de que esta fuerza *obra igualmente* sobre todos los cuerpos; pues ambos, que la misma significacion pueden tener, constituyen una prueba de gran valor para la hipótesis de *la unidad de la materia* que venimos suponiendo desde el principio.

Que la atraccion *obra igualmente* sobre todos los cuerpos, eualquiera que sea su tamaño, naturaleza y estado, se comprueba en el caso particular de la gravedad por la circunstancia de que todos caen con la misma velocidad. En efecto, colocando sobre un disco de cobre horizontal, sustancias pequeñas y ligeras y dejándolo caer en dicha posicion, disco y sustancias llegan á la vez al suelo: puesta una tarjeta ó pedazo de papel de canto entre dos láminas de vidrio verticales paralelas y un poco separadas, y otra de metal en las mismas condiciones,

en el supuesto de que partan de la misma altura, recorren en igual tiempo igual espacio. Un recomendable aparato del profesor Escriche permite hacer con toda comodidad esta demostracion.

* Realizados ambos experimentos sin las dichas ó análogas precauciones, parece que la atraccion no obra igualmente sobre todos los cuerpos porque la resistencia del aire modifica desigualmente la velocidad de caida de los mismos.

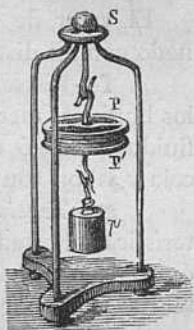
d—*Cohesion* se llama á una fuerza característica, aunque no propia, de los cuerpos sólidos, en virtud de la cual estos resisten á los cambios permanentes de forma y á la ruptura; en los líquidos demostraremos más adelante la existencia de una débil cohesion, y aun observaremos vestigios de ella en los gases.

Esta fuerza, al modo de la afinidad, no obra sensiblemente sino á pequenísimas distancias; su efecto es atractivo, toda vez que se opone á la division de los cuerpos en partes; pero solo en casos contados, como los citados á continuacion, es posible observar la union de dos trozos de un cuerpo por medio de la misma: un pedazo de plomo ó de goma cortado en dos pedazos con cierta limpieza, vuelve á reconstituirse uniendo las dos partes por las superficies recientes de division; dos láminas de vidrio colocadas en contacto íntimo, se sueldan con tal fuerza que en las fábricas de cristal prefieren ordinariamente romperlas y fundirlas ántes que separarlas. La fig. 11 da idea de este fenómeno: dos platillos de vidrio P, P', aproximados con las debidas precauciones á fin de evitar la interposicion de una gruesa capa de aire, resisten á la separacion hasta el punto de ser posible suspender el superior de un ganchito y adicionar al otro algun peso *p*.

Sometiendo ciertas sustancias en polvo, como el hierro, el cobre, etc., á la presion de muchos miles de kilógramos, llega á formarse un trozo único y compacto.

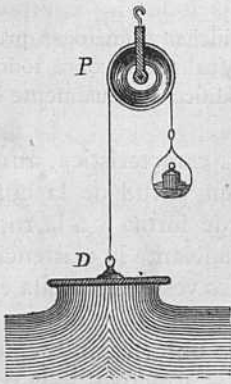
La cohesion varía de unos á otros cuerpos, y aun en uno mismo bajo la influencia del calor y de otras energías.

Fig. 11.



e—*Adhesion* es el nombre de una fuerza atractiva, muy análoga al parecer á la cohesion, que se manifiesta en el contacto de cuerpos diferentes por su estado físico.

Fig. 12.



La fig. 12 representa un experimento de adhesion entre sólidos y líquidos; sobre una polea fija *P* descansa un cordon de cuyos extremos penden el disco de vidrio *D* y un platillo iguales en peso; poniendo el disco en contacto con el agua de un vaso, es posible echar algunas pesas en el platillo sin que se separen el líquido y el sólido; ántes bien, el disco al elevarse levanta consigo una columna de agua, como indica el grabado. La adhesion entre sólidos y gases puede observarse sumergiendo en

el agua una lámina de oro, porque la capa de aire á la misma adherida se hace con esto visible. En la mayor parte de los casos la adhesion es muy difícil de comprobar experimentalmente.

El valor de esta fuerza se halla indudablemente relacionado con las distancias.

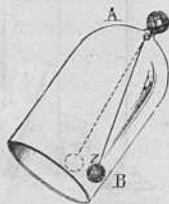
f—*Viscosidad* es una especie de cohesion propia de los líquidos, merced á la cual estos se presentan más ó menos fluidos, más ó menos pegajosos; las disoluciones de goma, cola y jabon son ejemplos muy notables de líquidos viscosos.

g—*Tension* es una fuerza ó forma de la energía, característica del estado gaseoso, correspondiente á la *expansibilidad* ó propiedad de aumentar de volúmen que presentan los gases; se reconoce por la *presion* que ejercen los cuerpos en este estado sobre las paredes de las vasijas que los encierran; y, como todas las fuerzas naturales, varía en funcion del espacio, observándose que aumenta cuando los gases ocupan poco volúmen, y disminuye cuando se extienden.

h—*Fuerza mecánica* suele llamarse á la energía actual que supone un cuerpo animado de movimiento de traslacion; en los astros, en los órganos de las máquinas en movimiento y en los de los animales puede observarse esta forma de la energía, una de las más á propósito, como se comprende fácilmente, para realizar trabajos ó producir movimientos.

i—*Sonoridad* es una forma de la energía actual observada en la materia ponderable, correspondiente á movimientos internos, como de trepidacion ó vaiven, á la cual es debida la sensacion sonora. Segun veremos en su dia todos los cuerpos terrestres poseen constantemente, en más ó ménos grado, cierta sonoridad, por más que el oido no la revele sino dentro de determinados límites; cuando esta agitacion interna alcanza un valor algo considerable puede llegar á realizar trabajos ó producir movimientos visibles al modo que la fuerza mecánica; colocando, en efecto, una campana de vidrio algo inclinada, y dentro, descansando sobre ella, un cuerpecillo suspendido como indica la figura 13, basta aumentar el estado sonoro normal de la campana por medio de un golpe ó por el frotamiento con un arco de violin para observar que el cuerpecillo se levanta y cae cual si le impulsara una fuerza mecánica.

Fig. 13.



j—*Calor* es otra forma de la energía, correspondiente, como el sonido, á movimientos internos de los cuerpos; no solo los terrestres sino todos los del universo parece que poseen cierta cantidad de energía calorífica variable de un momento á otro y susceptible de realizar trabajos mecánicos. Uno de los efectos más notables de esta forma de la energía es la produccion de cambios de estado en los cuerpos; así, un trozo de hielo (agua sólida) calentado suficientemente se convierte en agua líquida, y esta á su vez se trasforma en vapor ó agua gaseosa continuando la accion del calor; y por el contrario, sustrayendo energía calorífica de un gas, ó sea enfriándolo, puede hacérsele pasar á líquido y á sólido.

k—Cuando en un cuerpo se acumula mucha energía calorífica se hace luminoso: por donde se ve que la *luminosidad* es tambien forma de la energía y forma parecida ó relacionada con el calor.

l—*Electricidad* es otra forma de la energía que parece existir en todos los cuerpos del universo, á los cuales puede suponérseles cierto estado eléctrico normal ó neutro, en el que no son perceptibles los efectos de esta fuerza: cuando sobreviene un desequilibrio de electricidad entre dos cuerpos próxi-

mos, los efectos de la energía eléctrica aparecen bajo formas variadas y entre ellas produciendo movimientos ó realizando trabajos.

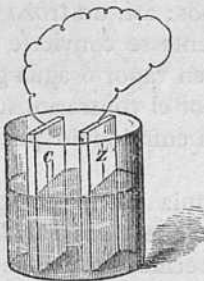
Fig. 14.



Si suspendemos de un hilo delgado de seda una esferilla de medula de sauco, y acercamos al aparato así constituido (figura 14) (que se llama *péndulo eléctrico*) una barra de lacre cuyo estado neutro eléctrico se ha perturbado por el frotamiento con un pedazo de paño, obsérvase inmediatamente un movimiento del cuerpo hácia el lacre ó atracción característica de la electricidad.

Si en vez de la barra de lacre frotamos una de cristal, á primera vista parece que el estado eléctrico de este último cuerpo es idéntico al que adquiere el primero; pero observaciones más atentas establecen diferencias bien marcadas entre ambos casos de manifestacion de la electricidad, y por razon de la naturaleza de los cuerpos en que primeramente se observó este hecho se han llamado *resinosa* y *vítrea* (actualmente *negativa* y *positiva*) á una y otra clase de electricidades ó modos de presentarse la energía eléctrica.

Fig. 15.



Sumergiendo en un vaso de cristal que contenga agua acidulada con ácido sulfúrico (fig. 15) una lámina de cobre *C* y otra de zinc *Z* terminadas al exterior por alambres, en el acto se observa una reaccion química y cada uno de los alambres se constituye en cierto estado eléctrico análogo al de la barra de lacre frotada; mas enlazándolos, como representa el grabado, directamente ó por medio de otro alambre, la energía eléctrica parece circular de un modo continuo, mientras dura la reaccion,

por el único hilo así constituido: esta manifestacion de la electricidad es conocida con el nombre de *corriente eléctrica*, así como el aparato de que nos hemos valido para producirla se llama *par eléctrico*, y los alambres que salen del zinc y del cobre respectivamente reóforos y *polos* del par.

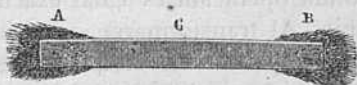
También en este caso de la corriente tiene lugar la distinción de dos clases de electricidad; habiéndose convenido en llamar *polo negativo* del par al extremo libre del zinc y *polo positivo* al del cobre, para significar las diferencias de energía eléctrica en los dos elementos del par.

II—Ciertos cuerpos naturales ó artificiales, como la piedra imán y el acero imantado, tienen la particularidad notable de atraer al hierro: las figs. 16 y 17 representan trozos de las

Fig. 16.



Fig. 17.

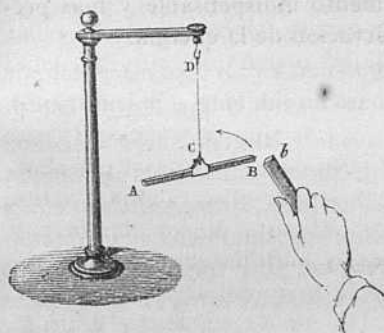


dos sustancias citadas á las cuales aparecen adheridas limaduras de hierro: de estos cuerpos se dice que están en *estado magnético*. El magnetismo es, pues, otra forma de la energía, muy relacionada por cierto, sino idéntica, como veremos en su día, con la electricidad.

Las propiedades magnéticas de los dos extremos de un

imán de acero no son iguales: suspendiendo una de éstas barras ó *agujas* imantadas por medio de un hilo (figura 18), se observa que el extremo *b* de otro imán que se acerque con la mano, repele al B del primero y atrae al A.

Fig. 18.



Esta circunstancia y la de que la barra A B se sitúa espontáneamente en la dirección norte-sur, exacta ó aproximadamente, han dado origen á las denominaciones *polo austral* y *polo boreal* con que se distinguen los dos extremos de un imán.

15—Las formas de la energía actual ofrecen el carácter común de tender á *difundirse* en el universo, como si la fuerza propendiese á estar uniformemente repartida en el mismo; así los cuerpos sonoros, calientes, luminosos, electrizados ó magnéticos van comunicando poco á poco su estado de movimiento

á la materia que los rodea; fenómeno que toma diferentes nombres, *conductibilidad, radiacion, influencia, induccion*, etcétera, segun los casos.

16— Otro hecho importantísimo que la experimentacion física ha puesto en evidencia, á propósito de las formas de la energía, es la *transformacion reciproca de las mismas* con gran facilidad en *proporciones equivalentes y constantes*; de tal manera que si una fuerza se convierte en otra y esta última se reconvierte en la primera, la cantidad de energía que aparece en la segunda operacion es igual exactamente á la que existia al principio. Al transformarse, por ejemplo, en calor la fuerza mecánica capaz de elevar 424 kilogramos á la altura de un metro en un segundo, se *produce* una cierta cantidad de energía calorífica que se llama *caloría*; y, á la inversa, cuando se *gasta ó desaparece* una caloría, puede regenerarse la fuerza capaz de levantar 424 kilogramos á un metro de altura en un segundo.

Este trascendental principio es conocido con el nombre de *ley de la equivalencia de las fuerzas naturales*; y la transformacion recíproca de las formas de la energía que el mismo sienta, constituye el complemento indispensable y más precioso del principio de la conservacion de la energía.



CAPÍTULO III.

CONSTITUCION MATERIAL DE LOS CUERPOS.

17—A—Uno de los hechos sobre que debió fijarse desde luego la atención de los observadores es la facilidad grande con que los cuerpos se fraccionan ó dividen por medios mecánicos en partes más pequeñas.

Estudiada físicamente esta divisibilidad encontramos que puede llevarse hasta un límite asombroso, y queda el convencimiento de que si no se pasa más allá, es solo por falta de medios materiales de hacerlo.

Los siguientes ejemplos dan idea de la extrema divisibilidad de los cuerpos. El oro puede reducirse á láminas tan delgadas que se necesita superponer 250.000 para formar el espesor de un centímetro. Wollaston ha fabricado alambres de platino de $\frac{1}{1200}$ de milímetro de espesor, 200 metros del cual constituían solo un *centígramo*, á pesar de ser el platino el más pesado de todos los metales. Existen animales microscópicos tan sumamente diminutos que en el volúmen de una gota de agua caben muchos millones, ¡y cuál no será la pequeñez de sus órganos y de las partes elementales de estos! Las materias colorantes y los olores ofrecen tambien ejemplos notables de divisibilidad.

B—El sencillo fenómeno de que nos ocupamos plantea una cuestion extremadamente difícil y trascendental.

¿Son divisibles los cuerpos hasta el infinito? ¿O tiene un límite el fraccionamiento de los mismos y las últimas partecillas indivisibles son la materia, de modo que los cuerpos, grandes ó pequeños, están constituidos por mera agrupacion de dichas partecillas como con granos de arena pueden formarse montoncitos, colinas, montes y cadenas de montañas?

18—A-a—Los fenómenos de combinación (**14—B-b**) ó producción de cuerpos compuestos, y de *descomposición* de estos en sus elementos, permiten abordar de una manera más profunda el problema de la divisibilidad.

b—Los cuerpos compuestos no lo son simplemente de otros, sino *de otros en proporciones ponderales definidas y constantes*: el *agua*, por ejemplo, es una combinación de oxígeno é hidrógeno en la proporción invariable de *ocho* partes, en peso, del primero y una del segundo; el *cinabrio* es un compuesto de mercurio y azufre en la proporción constante de *cien* pesos de uno y *diez y seis* de otro. Sin que sea dable alterar estas proporciones segun las cuales los cuerpos se combinan; de tal modo que intentando provocar la unión de *ocho* partes de oxígeno y *tres* de hidrógeno, se formarán *nueve* de agua y quedarán libres *dos* de hidrógeno.

Ocurre con frecuencia que dos ó más cuerpos simples forman diferentes compuestos; y entónces se observa el hecho no ménos notable de que *los pesos de los componentes varían de unas á otras combinaciones en relaciones sencillísimas*, segun se demuestra en los dos siguientes ejemplos:

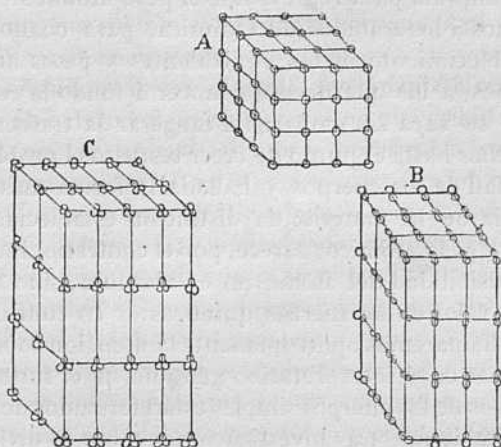
14 pesos de nitrógeno se combinan con 8 de oxígeno			
14	>	>	16 > ó sea 2×8
14	>	>	40 > > 5×8
14	>	>	32 > > 4×8
14	>	>	24 < > 3×8

28 pesos de hierro se combinan con 8 de oxígeno			
28	>	>	24 > ó sea 3×8
56 (2×28)	>	>	24 > > 3×8
84 (3×28)	>	>	32 > > 4×8

c—La interpretación dada á tan interesantes hechos parece desprenderse naturalmente de los mismos: consiste en suponer que los cuerpos simples están formados por partículas indivisibles con peso propio llamadas *átomos* (Fig. 18 A); y que los compuestos son agregados ó reuniones de grupos iguales de átomos, cada uno de los cuales representa la porción

más pequeña posible del compuesto (B y C) y recibe el nombre

Fig. 18.



de *molécula*. El hecho de la combinación se reduce en tal hipótesis á la formación de las moléculas, y éstas gozan una indivisibilidad relativa respecto de la existencia del compuesto.

d—*La ley de las proporciones definidas* y la de *las proporciones múltiples* de que en el presente número (**A-b**) hacemos mérito, despiertan la idea del establecimiento de los *pesos relativos de los átomos y de las moléculas*; llamando, por ejemplo, 8 al peso del átomo de oxígeno, el de hierro pesará 28, el de mercurio 100, etc.; y si asignamos al primero un valor 16, los otros estarán representados respectivamente por 56, y 200. En la columna tercera del cuadro en otro lugar insertado (**12 A-c**) se consignan los pesos atómicos relativos de los cuerpos simples, por más que su determinación corresponde á la Química.

Solo que las relaciones ponderales que el análisis químico acusa entre los elementos de un compuesto, no son suficientes para fijar los pesos atómicos de los mismos; consideraciones de otros órdenes inducen, en efecto, á suponer que la cantidad de muchos cuerpos simples que juega en las combinaciones está formada de dos átomos, es decir, al modo de una molécula; y de aquí resulta que los números que representan

las relaciones ponderales segun las cuales se combinan los cuerpos, ó sean sus *equivalentes*, estampados en la segunda columna del cuadro (12—A-c) sean en muchos de ellos mitad de la cifra admitida para representar el peso atómico.

Remitimos á los tratados de Química, para cuanto se refiere al establecimiento de los equivalentes y pesos atómicos de los cuerpos, á los que deseen conocer á fondo la cuestion.

B—No se vaya sin embargo á exagerar la trascendencia de estos hechos hasta el punto de creer resuelto el problema de la divisibilidad de los cuerpos y hallada la forma más simple de existencia de la materia; la distincion establecida entre equivalente y peso atómico, parece, por el contrario, indicio de que la indivisibilidad del átomo no es absoluta, sino relativa respecto del valor de las fuerzas químicas: y en confirmacion de esta idea llamaremos oportunamente la atencion sobre algunos fenómenos cuya interpretacion genuina es el supuesto de que los átomos de los cuerpos simples están formados de partes.

19—El límite de nuestras investigaciones sobre la division de los cuerpos no permite resolver nada en definitiva acerca del problema que dicha propiedad plantea, y que apesar de los esfuerzos de la Física y de la Química continúa formando en el misterioso grupo de todos los que tienden á penetrar en la difícil cuestion de lo que es la materia. Los anteriores hechos y los expuestos á continuacion bastan, sin embargo, para establecer dentro del terreno positivo ciertas hipótesis sobre la constitucion de los cuerpos, que *actualmente* satisfacen á las necesidades de la ciencia y de la práctica.

20—A—Los cuerpos cambian fácilmente de volúmen, bien en aumento, bien en disminucion, y esta propiedad puede ser considerada como una prueba de que las moléculas, por cuya agregacion están aquellos formados, no se hallan en contacto, sino separadas á ciertas distancias.

B-a—Se llama *compresibilidad* á la disminucion de volúmen que cualquier sólido, líquido ó gas sufre bajo la influencia de esfuerzos mecánicos exteriores; *contraccion* al mismo fenómeno cuando es producido por el enfriamiento; y *dilatabilidad* ó *dilatacion*, al aumento de volúmen que en los cuerpos determina la accion del calor.

Aunque parecen dos los medios para producir cambios de

volúmen en los cuerpos (calor y presión), á rigor no hay diferencia esencial entre ellos, según lo demuestran las enormes presiones que una masa dilatándose puede ejercer sobre los obstáculos que se opongan al aumento de sus dimensiones.

b—Multitud de ejemplos comprueban la variabilidad de volúmen de los cuerpos.

La acuñación de medallas y monedas por presión, y la disminución sensible de longitud que experimentan las columnas de edificios que sostienen grandes cargas, patentizan la compresibilidad de los sólidos. Perkins llenó completamente de agua una vasija de metal, de paredes muy resistentes, provista de un orificio con válvula que se abría hácia adentro, y habiendo intentado introducir más líquido á viva fuerza, lo consiguió y demostró por el aumento de peso de la vasija. Los gases son muchísimo más compresibles que los sólidos y líquidos, como puede verse en el *eslabon neumático* (Fig. 20); aparato que consiste en un cilindro cerrado por uno de sus extremos, en cuyo interior puede correr un émbolo ó piston por medio de un vástago; aplicada á este tallo la fuerza correspondiente, el émbolo baja reduciendo de volúmen el aire encerrado en el interior.

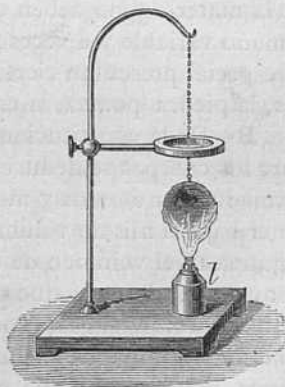
Fig. 20.



La dilatación y contracción de los sólidos bajo la influencia

del calor se demuestran con el anillo de S'Gravesande (Fig. 21), que consiste en un aro de metal por el que pasa fácilmente una esfera de la misma sustancia y casi de igual radio cuando están ambos á la misma temperatura; calentando la esfera aumenta de volúmen y no cabe por el anillo, pero á medida que se enfría se contrae y vuelve á pasar: podría hacerse el experimento, á la inversa, enfriando considerablemente el anillo y observando que la reducción de su diámetro no permite el paso de la esfera. Los académicos de Florencia llenaron

Fig. 21.



un matraz A (Fig. 21) como de un litro de cabida, y parte de su cuello largo y estrecho BC, con alcohol teñido de cochinilla, é introduciendo el aparato en agua caliente hasta la ebullicion, observaron que el alcohol subia, con lo que quedó demostrado que los líquidos son dilatables y en mayor grado que los sólidos.

Fig. 21.



La variabilidad de volúmen de los gases bajo la influencia del calor se comprueba soldando (Fig. 22) un pequeño depósito A en el

Fig. 22.



extremo de un tubo de cristal abierto, dentro del cual se coloca la gota ó índice líquido *m*; basta aplicar la mano á la esfera para ver correr el índice empujado por el aire que se dilata. Los gases aumentan ó disminuyen de volúmen, calentándolos ó enfriándolos, en escala mucho mayor que los sólidos y líquidos; así como estos últimos se dilatan tanto más, cuanto más cerca se encuentran del cambio (14—B-j)

al estado de vapor ó gaseoso que la accion del calor determina tambien en ellos.

21—A—Una vez admitido que los cuerpos están formados por átomos y moléculas separadas entre sí, la existencia de huecos numerosísimos dentro de cada cuerpo es irrechazable; estos espacios, invisibles por lo extremadamente pequeños, se llaman *poros físicos*; son propios de todas las formas físicas de la materia y no deben confundirse con otros intersticios de tamaño variable y á veces grande, que por efecto de estructura especial presentan ciertos sólidos como las pieles, las maderas, la piedra pomez, la esponja, etc.

B—De la constitucion material que venimos estableciendo para los cuerpos se deduce que aun cuando dos de ellos estén formados por átomos y moléculas de igual peso, pueden contener bajo el mismo volúmen cantidades diferentes de materia segun sean el volúmen de dichas particillas, el tamaño de los poros, etc.; de aquí que se distingan en los cuerpos el volúmen *aparente* y el *real* ú ocupado por los átomos, siquiera sea este indeterminable; y que se haya creado la nocion de *masa física*, nombre con que se designa á la cantidad efectiva de materia que representa la suma de los átomos de cada cuerpo.

C—Dos cuerpos que en igualdad de volúmen tengan la misma masa ó cantidad de materia se llaman igualmente densos; y en general por *densidad* se entiende *la cantidad real de materia que contiene la unidad de volúmen de cada cuerpo*, ó bien *la razon entre la masa y volúmen de cualquier trozo del mismo*: llamando D á la densidad, M á la masa y V al volúmen tendremos segun esto

$$D = \frac{M}{V} \quad \text{ó si } V=1 \quad D=M.$$

D-a—Se comprende sin gran esfuerzo que la masa y la densidad no pueden ser determinadas en absoluto; pero como tales datos revisten gran importancia, se ha procurado establecerlos relativamente ó sea adoptando unidades que sirvan de términos de comparacion. Las fórmulas de la densidad en dos cuerpos diferentes pero de igual volúmen serán

$$D = \frac{M}{V}, \quad D' = \frac{M'}{V};$$

y divididas ordenadamente dan la siguiente igualdad

$$\frac{D}{D'} = \frac{M}{M'};$$

que representa una proporcion directa entre las densidades y las masas de los cuerpos á igualdad de volúmen, y nos dice que *para hallar la densidad D de un cuerpo con respecto á la D' de otro, considerada como unidad, hasta ver cuántas veces la masa del primero es mayor que la del segundo en igualdad de volúmen*.

Por *densidad relativa* de un cuerpo entenderemos, pues, la razon ó cociente entre la masa del mismo y la de otro que se tome como unidad, á igualdad de volúmen de ambos: se ha convenido en adoptar por tipos de comparacion ó cuerpos cuya densidad se supone igual á *uno*, el agua para los sólidos y líquidos, y el aire atmosférico para los gases.

b—La única dificultad que ofrece la determinacion de las densidades relativas, es la de hallar un procedimiento para conocer el valor de la razon ó cociente de dos masas (cantidades) cuya magnitud absoluta se ignora; problema que ha sido resuelto prácticamente con gran sencillez de la manera que en su dia veremos pero cuyo fundamento vamos á explicar ahora.

Recordando al objeto que la atracción aumenta proporcionalmente á la cantidad real de materia (**14—B-c**) observaremos que en virtud de esto, cuando dos ó más cuerpos se encuentren bajo la influencia de una gran masa, como el planeta Tierra, parecerá que son atraídos por fuerzas proporcionales á la magnitud de las masas de los referidos dos ó más cuerpos.

Esta cantidad de atracción con que cada cuerpo es solicitado para caer sobre la tierra es lo que se llama su *peso*; y el hecho de que un cuerpo pese doble ó triple que otro, en igualdad de circunstancias, no significa sino que su masa es dos ó tres veces mayor.

Tal proporcionalidad entre los pesos y las masas, que puede representarse por la igualdad

$$\frac{P}{P'} = \frac{M}{M'}$$

establece que el valor de la razón de dos masas es el cociente de dividir los pesos de las mismas; luego para *determinar la densidad relativa de un sólido*, por ejemplo, *bastará dividir su peso por el de igual volumen de agua*. Estos cocientes se llaman *pesos específicos*; son proporcionales, como se comprende, á las densidades absolutas, y representan perfectamente á las relativas.

c—La columna 5.^a del cuadro incluido en el número **12** contiene los pesos específicos de los cuerpos simples; aquellos que, por efecto del estado gaseoso en que en las condiciones ordinarias se presenta el cuerpo, están determinados con respecto al aire, van precedidos de la letra **a**.

E—Cuando un cuerpo se calienta su densidad disminuye; y al enfriarse ó contraerse, aumenta, por el contrario, de peso específico.

22—A—Los gases simples ofrecen un fenómeno por demás interesante para nuestro objeto actual; *sus densidades respecto del hidrógeno representan justamente los pesos atómicos de los mismos con relación á dicho cuerpo considerado como unidad*. De donde se deduce lógicamente que *en igualdad de circunstancias, todos los gases tienen el mismo número de átomos*.

B—Este fenómeno autoriza á usar indistintamente las palabras volumen y átomo tratándose de los gases ó vapores;

mas como existen (**18—A-d**) muchos cuerpos simples que funcionan *molecularmente* en las reacciones químicas, pone á la vez de relieve con nueva importancia para el conocimiento de la constitucion material de los cuerpos, á *la molécula química de los mismos*; el hidrógeno, en efecto, juega en las reacciones por dos átomos ó volúmenes y por lo tanto *su peso molecular* será 2, si el del átomo es 1; los *pesos moleculares* de todas las sustancias simples, en estado gaseoso, que se encuentren en igual caso estarán representados, en relacion con el del hidrógeno, por la doble densidad de tales vapores ó gases respecto de este cuerpo: y la mayor parte de los gases compuestos tienen tambien por peso molecular el doble de su densidad respecto del hidrógeno. Luego bajo este punto de vista aparecen borrados los límites ó diferencias de constitucion material entre los cuerpos simples y compuestos.

C—En la columna 4.^a del cuadro incluido en el número **12** están consignados los pesos moleculares de algunos simples. **23**—Admitiendo Kopp que el volúmen real de un cuerpo es proporcional á la masa ó materia del mismo, é inversamente proporcional á su densidad, ha fijado numéricamente el *volúmen* relativo de los átomos, sin más que dividir el peso atómico de cada cuerpo por su peso específico.

En la 6.^a columna de la tabla del número **12** se consignan los volúmenes atómicos de vários cuerpos simples; y aunque la dudosa exactitud del procedimiento de Kopp no permite asignar á tales cifras una importancia definitiva, aparecè sin embargo, que los gases hidrógeno, cloro, oxígeno y nitrógeno tienen sensiblemente el mismo volúmen atómico. Idéntica observacion puede hacerse respecto de los cuerpos que ofrecen cierta analogía en sus propiedades ó que cristalizan en iguales formas; sirvan de ejemplo el grupo de cuerpos ródio, rutenio, paladio, platino, indio, osmio, y el de los manganeso, hierro, níquel y cobalto.

24—A—Como resúmen de todo lo dicho en el presente capítulo puede establecerse el siguiente concepto general de la constitucion material hipotética de los cuerpos:

- 1.^a *Los cuerpos son agregados de moléculas y átomos.*
- 2.^a *Estas particillas se hallan situadas á distancias variables bajo la influencia de la energía.*

3.^a *En igualdad de circunstancias todos los gases tienen igual número de moléculas compuestas de átomos iguales (cuerpos simples) ó desiguales (cuerpos compuestos.)*

4.^a *Cuando un gas se liquida y un líquido se solidifica, las distancias intermoleculares se hacen más pequeñas.*

5.^a *La indivisibilidad de los átomos no debe ser reputada absoluta, sino con relacion al valor de las fuerzas químicas.*

6.^a *El peso de los átomos y de las moléculas, su volúmen y forma, y la magnitud de sus distancias mútuas determinan la existencia de propiedades diferenciales entre los cuerpos.*

B—Es bastante corriente admitir la existencia de *partículas gaseosas, líquidas y sólidas* representantes de la menor porcion posible de un cuerpo en cada uno de los tres estados.

C—Al éter se le considera como un océano inmenso y elástico constituido por partecillas á distancia y dotado, por lo mismo, de cierta densidad: como llena completamente el universo observable y todos los cuerpos están sumergidos en él y penetra en los mismos bañando en absoluto su interior, es lógico pensar que su constitucion no debe ser homogénea, sino que dentro ó en las inmediaciones de las otras formas de la materia, la etérea experimentará al ménos algun cambio de densidad ó elasticidad.

APLICACIONES.

25—**A**—La influencia del calor sobre los cuerpos y sobre los fenómenos que en ellos se verifican es tan grande, que desde el primer momento se impone la necesidad de tener acerca de la presencia de este agente fisico alguna idea más precisa que la vulgar de calor y frio en distintos grados que todo el mundo posee y debe á los sentidos: á este objeto se han inventado los aparatos llamados *termómetros*, fundados en la variabilidad del volúmen de los cuerpos bajo la influencia de la energia calorífica.

B—Se llaman cambios de *temperatura* á las variaciones sensibles de calor que sufren los cuerpos; y siquiera sea punto ménos que imposible definir lo que se entiende por temperatura, admitiremos esta palabra con el significado que se desprende de la explicacion siguiente: un cuerpo colocado en condiciones tales que no gane ni pierda calor, posee un volúmen determinado y constante que puede definirse diciendo que corresponde á una cierta temperatura; si el cuerpo, sin cambiar de estado, gana ó pierde calor, su volúmen cambia á la par, y convenimos en que su temperatura sube ó baja: dos o más cuerpos en presencia están á la misma temperatura cuando no varian de volúmen. Esto sentado, podemos adoptar como *unidad de temperatura* una variacion de volúmen convencional.

C-a—Como al ocuparnos del calor haremos un estudio más detenido de los termómetros, vamos por el pronto á dar tan solo una idea del de mercurio, generalmente usado.

Es un aparato en esencia idéntico al (20—B—b—Fig. 22) que emplearon los académicos de Florencia para probar la dilatación de los líquidos; solo que el depósito es pequeño, el tubo tiene un diámetro igual y comparable al de un cabello (capilar), y el líquido del interior es el metal mercurio. Los cambios de temperatura determinan variaciones de volumen más considerables en el mercurio que en el vidrio, y, en razón á ello, la columnita metálica se acorta ó alarga dentro del tubo; de modo que admitiendo proporcionalidad entre las variaciones de la temperatura y las del volumen, bastará medir los movimientos del mercurio para tener conocimiento de los cambios de aquella. A este efecto va provisto el termómetro de una escala, que se construye (Fig. 24) sumergiendo el instrumento en hielo machacado y fundente, y marcando con una rayita y un *ceró* el punto donde se fija el extremo de la columna mercurial; después se coloca dentro de un aparato de ebullición de agua, representado en la Fig. 25, de modo que quede completa-

Fig. 24.

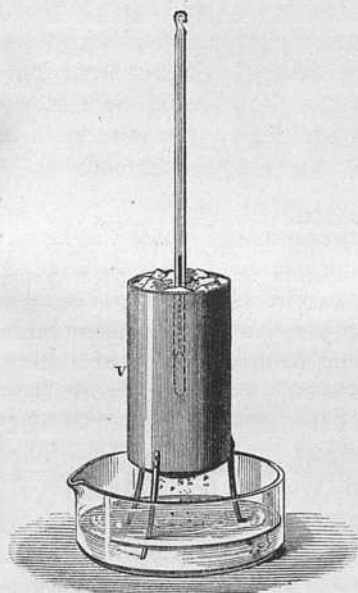
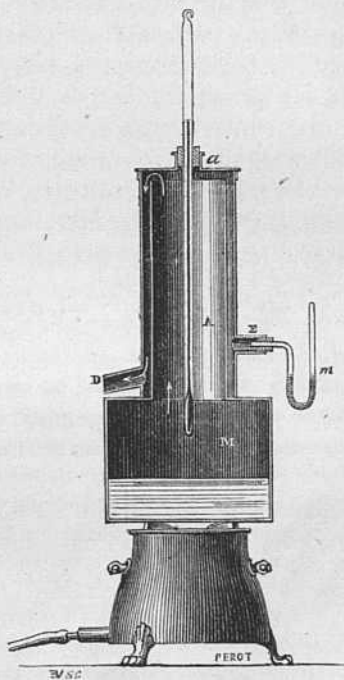


Fig. 25.



mente rodeado del vapor del líquido hirviente, pero sin que el depósito toque al agua; y, operando al nivel del mar, se pone otra raya con el número 100 en la parte del tubo á que suba el extremo de la columna de metal: el espacio entre ambas rayas se divide en 100 partes que se llaman *grados*, y queda convenido que el *grado termométrico centigrado* representa la *unidad de temperatura*.

26—Dijimos (**16**) que caloría es la cantidad de energía calorífica producida por la transformación de la fuerza mecánica capaz de elevar 424 kilogramos á la altura de un metro en un segundo; pero como esta cantidad de calor es cabalmente la necesaria para aumentar un grado la temperatura de un kilogramo de agua líquida, quedan por este hecho en cierta relación los grados termométricos con la medida del calor y de todas las restantes fuerzas naturales.



CAPITULO IV.

CONSTITUCION DINÁMICA DE LOS CUERPOS.

27—A—Como la mayor parte de los fenómenos parecen ser meras manifestaciones de movimientos moleculares de los cuerpos, no cabe duda acerca de la intervencion de la energía en semejantes hechos; pero miéntras los fenómenos se verifican, casi siempre pueden observarse variaciones y trasformaciones de las formas de la energía; luego preciso es ver en los átomos y moléculas el asiento de las fuerzas naturales, é importante, por lo tanto, fijar la constitucion dinámica de los cuerpos al mismo tiempo que su constitucion material.

B—Las formas de la energía, elasticidad, afinidad, cohesion, calor, electricidad, etc., de que (14) hemos dado noticia casi sin otro fin que hacer constar su existencia, van, pues, al presente á ser objeto de nuestra atencion bajo un nuevo punto de vista: suponiéndolas residiendo en las particillas cuya agregacion da origen á las masas de todos tamaños, é intentando esclarecer lo relativo al papel que desempeñan en la existencia de los cuerpos y en la realizacion de los fenómenos naturales.

28—El calor y la electricidad son las dos formas de la energía que más juegan en los fenómenos físicos y químicos, ofreciendo tambien el carácter, juntamente con la fuerza mecánica, de ser las que se prestan á la realizacion de mayor variedad de trabajos. Tal circunstancia parece robustecer la idea (14—B-j-1) de que dichos agentes son fuerzas vivas correspondientes á movimientos de las masas moleculares; concepcion muy conforme, por otra parte, con ciertos modos de produccion de ambas energías que revelan su naturaleza mecánica.

Si golpeamos, en efecto, un cuerpo con un martillo, aparece calor; lo que se interpreta admitiendo que la fuerza viva

de la masa total del instrumento se divide en tantas fuerzas vivas como pequeñas masas moleculares del mismo y del cuerpo describen, individual pero simultáneamente, invisibles trayectorias despues del choque; y estableciendo, como consecuencia, que la suma de estas fuerzas vivas moleculares es idéntica á la fuerza viva del martillo: cierta parte de la agitacion interna producida en los cuerpos que chocan es lo que se llama calor. Frotando dos masas cualesquiera se calientan y electrizan á la vez; pero la anterior explicacion es igualmente aplicable á estos hechos.

La facilidad de trasformar el calor y la electricidad de modo que, al desaparecer uno ú otra, se produzcan el movimiento de un martillo ó el frotar de dos cuerpos, precisa de una manera notable el concepto que de dichas formas de la energía dejamos establecido.

29—A-a—El estudio de los efectos físicos del calor sobre los cuerpos es por demás interesante. Exponiendo un sólido á la accion del fuego, su temperatura se eleva y á la par empieza á dilatarse, es decir, á presentar sus moléculas en movimiento de separacion; y como la experimentacion enseña que una misma cantidad de calor, ó número de calorías, aplicada á pesos iguales de distintas sustancias, no los dilata ni calienta igualmente, parece lógico suponer que la energía calorífica, al obrar sobre cada masa, se divide en partes, de las que solo una es sensible y acusada por el aumento de temperatura. Observemos sin embargo, que basta considerar á las moléculas ó á los átomos de los cuerpos como residencias de la fuerza cohesion, por ejemplo, para que la dilatacion sea un trabajo mecánico (es decir el acto en que una fuerza recorre cierto espacio), cuya realizacion, como la de todo trabajo, exige el consumo de cierta cantidad equivalente de energía actual ó fuerza viva; con lo cual el hecho anterior, mecánicamente interpretado, se reduce á que la energía calorífica al obrar sobre los cuérpos, se gasta en parte en trabajos, como el de la dilatacion, mientras otra parte se conserva bajo la misma forma de movimiento molecular calorífico, aumentando el que ya préviamente tuviera el cuerpo.

b—Llegado el momento en que el sólido se *funde* ó pasa al estado líquido, obsérvase que su temperatura perma-

nece constante mientras se verifica el cambio; lo que indica que entonces hace potencial todo el calor que recibe, ó, lo que es lo mismo, que este se gasta en producir trabajos; la cantidad de energía calorífica que cada sólido necesita para dejar de serlo se llama *calor latente de fusion*.

c—Una vez líquido el cuerpo, la fuerza viva calorífica vuelve á dividirse, principalmente, en dos partes; la que se manifiesta por la elevacion de temperatura de la masa, y otra que continúa produciendo el trabajo de la dilatacion; hasta que, á un cierto grado termométrico, el tránsito al estado gaseoso ó de vapor se presenta con entera franqueza, acompañado generalmente del fenómeno del *hervor ó ebullicion*, y nuevamente deja de observarse aumento de calor sensible en el líquido expuesto al fuego, ó segunda vez se da el caso de gastarse toda la energía calorífica en realizar los trabajos, moleculares especialmente, indispensables para que un cambio de forma física tenga lugar; la cantidad de calor que en este caso recibe el líquido y no le calienta, se llama *calor latente de vaporización*.

Calentando agua, por ejemplo, en una vasija resistente y cerrada, la presión del vapor sobre el líquido impide la ebullicion de éste. Como, segun veremos más adelante, no se verifica en tales condiciones el salto brusco de líquido á gas, tampoco há lugar á la observacion del calor latente de vaporización.

d—A la inversa, si, quitando calor á un gas, despues de reducirlo de volúmen se llega por fin á liquidarlo, y si continuando el enfriamiento y la contraccion consiguiente del líquido, éste acaba por trasformarse en sólido, el momento de ambos cambios está señalado por la aparicion, bajo forma sensible, del calor latente ó que se consumió ó que pasó al estado potencial durante la fusion y la vaporización.

B—De los anteriores hechos se deducen tres consecuencias importantes bajo el punto de vista de la constitucion dinámica de los cuerpos.

1.^a *El volúmen de un cuerpo es dependiente en cada momento, entre otras causas, de una cierta cantidad de energía calorífica absorbida y empleada en mantener las moléculas á ciertas distancias.*

2.^a *Todo líquido lo es merced á una cantidad de energía calorífica que absorbe y reside en el mismo en estado potencial.*

3.^a *Los cuerpos gaseosos persisten en tal forma mientras retienen potencialmente otra cantidad grande de dicha energía.*

C—Cuando aplicamos la acción del calor á un gas, se le puede mantener en una vasija de volúmen constante, y en este caso su tension crece con la temperatura; ó facilitarle el aumento de volúmen, y entónces se dilata continuamente sin que varíe la presion que ejerce sobre las paredes de la capacidad que lo contiene: á la inversa, enfriándolo, ó sea robándole calor, pierde de tension y de volúmen. Comprimiendo un gas su tension aumenta y tambien abandona calor; como si le dejamos extenderse en la atmósfera, absorbe energía de sí mismo y su temperatura y tension disminuyen. De todo lo cual deducimos:

4.^a *La tension y volúmen de un gas dependen de cierta cantidad de energía que sus moléculas absorben y desprenden fácilmente bajo la forma de calor.*

30—A—Teniendo en cuenta los hechos anteriores, así como el desarrollo característico de la cohesion en los sólidos, la movilidad y poca coherencia de los líquidos, y la expansibilidad y tension de los gases, puede admitirse como hipótesis racional:

1.^o *En los sólidos las moléculas están obligadas á permanecer á distancias sensiblemente fijas, y dispuestas en direcciones casi invariables; tales partecillas no podrán verificar sino movimientos de conjunto ó vibraciones interiores que determinen la oscilacion de las mismas alrededor de una posicion de equilibrio, y á lo sumo algun giro en determinados casos.*

2.^o *En los líquidos parece que las moléculas solo están obligadas á permanecer á distancias fijas unas respecto de otras, sin que esto se oponga á los cambios de sus posiciones relativas; en virtud de lo cual las rotaciones serán de hecho posibles para dichas partículas, así como tambien ciertos movimientos de traslacion, además de los movimientos interiores que hemos asignado al estado sólido.*

3.^o *En el estado gaseoso las moléculas están dotadas de los tres géneros de movimiento; traslacion (de que dependen la expansibilidad y la tension); rotacion (que se desenvuelve en los*

choques de unas con otras), y *vibracion* (que corresponde á la temperatura.)

B—Esta concepcion dinámica de los estados físicos de los cuerpos se halla en completa armonía con multitud de fenómenos que más adelante irán siendo objeto de nuestro estudio.

31—A—Dentro de la hipótesis anterior es evidente que cuando un cuerpo sólido se hace líquido, la naturaleza del movimiento de sus moléculas se modifica; lo que representa un cierto trabajo y el consiguiente gasto de fuerza viva, que es *el calor latente de fusion*.

Si un líquido pasa al estado gaseoso, como el cambio que ha de sufrir en sus movimientos moleculares es considerable, puesto que además de cierto grado de vibracion es preciso que las moléculas adquieran un movimiento de traslacion tan rápido que las acciones atraccion, cohesion, etc., resulten despreciables, se realiza un trabajo interno de más cuantía y será necesario gastar en él una notable cantidad de fuerza viva; y efectivamente *el calor latente de vaporizacion es mucho mayor que el de fusion*.

B—Calentando un gas no podremos hacer físicamente otra cosa que aumentar sus tres géneros de movimiento, y, por consiguiente, hacerle ganar en temperatura, fuerza elástica ó volúmen.

C—La posibilidad de que los gases se extiendan sin variacion de temperatura, es evidente: para ello bastará que al dilatarse no realicen trabajo alguno.

D—Compréndese tambien que la temperatura cero del termómetro no representa la falta absoluta de calor; el físico obtiene, en efecto, temperaturas muy inferiores á la del hielo, y el cero absoluto no puede llegar mientras las moléculas no queden privadas del movimiento vibratorio en que consiste el calor. Abordada por medio del cálculo la determinacion del cero absoluto, resulta corresponder este al grado 273 bajo cero del termómetro.

32—Una particularidad notable ofrecen los gases simples considerados en condiciones apartadas de su liquefaccion; calentando cantidades que representen sus pesos atómicos, ó sea volúmenes iguales de los mismos (**22**), necesitan todos idéntico

número de calorías para elevar un grado su temperatura: hecho trascendental cuya significacion puede ofrecer cierto fondo de analogía con el ya conocido (14—B-c) de que la atraccion obra igualmente sobre todos los cuerpos.

33—A—Los fenómenos de combinación arrojan nuevas luces sobre el problema de la constitucion dinámica de los cuerpos.

De conformidad con lo que venimos exponiendo, se admite que en el acto de la reaccion química hay cierta precipitacion de unas moléculas sobre otras y que estos choques determinan la aparicion del calor que acompaña al fenómeno. La circunstancia de producirse este agente durante la reaccion en cantidad extraordinaria, se explica en muchas ocasiones observando que las moléculas de los cuerpos están animadas de velocidades indudablemente muy diferentes; y que al fundirse estas en una comun de la molécula compuesta formada, puede llegar á ser muy grande la fuerza viva que desaparece bajo la forma de traslaciones, etc. aisladas, y toma la de vibracion calorífica de la molécula producida.

A esto se añade que ciertos fenómenos físicos simultáneos, como el de formarse compuestos líquidos con componentes gaseosos, ó sólidos con líquidos, etc., pueden hacer aparecer nuevas cantidades de calor en el acto de la combinacion; ó por el contrario gastar parte del calor producido en la reaccion química; tales adiciones y restas son, sin embargo, pequeñas relativamente á la cantidad de calor producida por la accion química; razon por la cual debe buscarse en las mismas moléculas elementales el origen del calor desprendido.

B—Pero esta cantidad de calor es con frecuencia tan extraordinaria (miles de calorías) que no hay modo de atribuir racionalmente su origen á la causa ántes indicada, es decir á la pérdida de fuerza viva ó energía actual correspondiente á los diversos movimientos de las partículas componentes; aparte, además, de que en ciertas combinaciones gaseosas no se puede suponer diferente fuerza viva al compuesto que á sus elementos y sin embargo hay aparicion de una enorme cantidad de calor. Esta energía debe tener otro origen diferente, que se halla fuera de toda teoría calorífica fundada en datos físicos, como, por ejemplo, trabajos realizados dentro de cada molécula por cambios de posicion de los grupos dobles ó múltiples

que la constituyen con frecuencia, ó bien otros trabajos especiales desconocidos, ó *acaso una reserva de fuerzas vivas propias de los átomos elementales dependiente de su estructura en cuanto los consideramos formados de particillas de éter ó de otras más infinitamente pequeñas que las de este fluido universal.*

El calor procedente de tales orígenes puede ser, en suma, independiente de cuanto haga relacion con las temperaturas y las trasformaciones mecánico-térmicas que conocidamente juegan en las reacciones, dado que dicha energía atómica no reviste la forma de calor por más que en él puede trasformarse; y el hecho en cuestion descubre horizontes sin límites tras la vieja concepcion del *átomo indivisible* para las fuerzas físicas y químicas de que disponemos.

Los últimos átomos de los cuerpos parecen, pues, residencias de grandes cantidades de energía, á las cuales se deben relacionar indudablemente las *afinidades* de los mismos.

34—A—Establecida la naturaleza mecánica de la electricidad, vamos á fijar nuestra atencion en uno de los efectos más notables de esta forma de la energía; en la descomposicion de los cuerpos compuestos por la corriente eléctrica.

B—La relacion entre la energía eléctrica y la afinidad es tal, que si en una reaccion química desaparecen ó entran en combinacion 65 gramos de zinc puro (cantidad que representa su peso atómico), la corriente eléctrica producida (**14—B-1**) es capaz de descomponer simultáneamente á una série de compuestos á través de los cuales pase, como agua (un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno), yoduro de plomo fundido (un átomo de plomo y dos de yodo), cloruro de estaño fundido (un átomo de estaño y dos de cloro) etc., de modo que queden libres

2	gramos de Hidrógeno	2×1
16	> Oxígeno	
207	> Plomo	
254	> Yodo	2×127
118	> Estaño	
71	> Cloro	$2 \times 35,5$

Números que representan justamente los pesos atómicos ó

moleculares de los elementos en estos casos (**12—A-c**), y en otros sus equivalentes, y á que se ha dado el nombre de *equivalentes electro-químicos*.

C—Tales hechos tienen una significacion grande, pues aceptando que la electricidad es una forma de movimiento y que los cuerpos terrestres ofrecen constantemente cierto estado eléctrico ó electro-magnético (bien por influencia del sol, bien por causas que residen en el planeta), al observar lo importante del papel que dicho agente juega en las reacciones químicas, parece imponerse la idea de la existencia en las moléculas de una nueva cantidad de energía en forma distinta de la calorífica. Por otra parte la ley de descomposicion de los cuerpos acabada de citar, consigna algo que en el fondo ofrece gran analogía con la igualdad de velocidad con que caen las moléculas (**14—B-c**), y con la igual cantidad de calor que exigen los átomos para adquirir la misma temperatura (**32**).

35—Como principio general vamos reconociendo en las moléculas depósitos de energía cuyo efecto es tender á separarlas, ó sean movimientos que producen apariencias de fuerzas repulsivas. Pero la atraccion, la cohesion, la afinidad etc. revelan la existencia de formas de la energía que comunican á las moléculas y á los átomos una notable aptitud para unirse y permanecer unidos. ¿A qué movimientos internos puede atribuirse tal resultado?

Cuestion es esta acerca de la cual nada se sabe; acabamos de ver en las reacciones químicas (**33—B**) indicios de la existencia de una reserva de energía molecular que puede residir en los elementos constitutivos de los cuerpos bajo forma no calorífica, aunque en el caso de las reacciones se dá á conocer, en parte regularmente, como calor ó electricidad; pero á no dudar se trata de movimientos fuera del alcance de nuestra observacion y es posible que hasta de toda induccion.

Y no debe olvidarse que todas las formas de la energía que nosotros clasificamos por sus efectos ó apariencias, en hecho de verdad no se prestan á semejantes divisiones: admítese, por ejemplo, generalmente, que cuando en una masa se acumula mucha energía calorífica (**14-B-k**), ó sea cuando el movimiento calorífico adquiere un cierto grado de velocidad, deja de calentar y de dilatar los cuerpos, y de hacerlos cambiar de es-

tado etc., y *alumbra* ó le llamamos luz; como en su día veremos tambien que si dicho movimiento se hace aun más rápido, tampoco alumbra y constituye una forma oscura de la energía, susceptible sin embargo de producir reacciones químicas.

Otro tanto podemos decir de la sonoridad: es un movimiento interno de existencia bien y fácilmente comprobada; pero aun así y todo tampoco caben dudas acerca de que semejante agitacion molecular solo es perceptible como sonido dentro de ciertos límites de velocidad más acá y más allá de los cuales el movimiento existe, pero pasa desapercibido ó produce otros efectos ó apariencias diferentes del sonido.

Todo lo cual quiere decir que si ciertos movimientos de las moléculas representan la energía sonora, otros el calor, la luz, la electricidad etc., como en definitiva tales apariencias de los movimientos dependen del tamaño de las masas que se agitan, de su velocidad, de la naturaleza de sus movimientos, de los sentidos, del grandor de las masas conmovidas etc.; cuanto se refiere á los efectos del estado mecánico de las partes de las moléculas, es materia de conocimiento dentro de un mundo fuera de nuestro alcance; y, aunque reconozcamos siempre aptitud en la energía para dar origen por trasformacion á calor, etcétera, no puede ser ciertamente calorífica ni ninguna de las conocidas, la forma de la energía atómica, ni es fácil comprender las apariencias y efectos á que puede dar lugar.

Ignorándose además hasta qué punto los átomos y las moléculas pueden tener una constitucion complicada, no repugna admitir que aun en estas energías de naturaleza desconocida, que podemos llamar en conjunto *energías residentes* en los átomos y moléculas, quepan diversos órdenes ó grados á que pudieran muy bien corresponder la atraccion, la afinidad, la cohesion, etc.

36— La elasticidad parece la resultante final de todas las acciones atractivas y repulsivas que corresponde á cada estado de equilibrio de un conjunto de moléculas ó cuerpo; así se concibe que obre como atraccion ó repulsion molecular, según forcemos á estas partecillas á unirse ó separarse; y se explica el hecho de que las moléculas y átomos, si están formados como los cuerpos, puedan ser tambien elásticos.

Esta concepcion asemeja la elasticidad por sus efectos á la gravitacion, y los cuerpos á los sistemas solares, dentro de los cuales los cambios de posicion de cada astro determinan movimientos ó perturbaciones en los restantes.

37—A—En resúmen, hé aquí cómo concebimos la constitucion dinámica de los cuerpos.

1.^o *Merced, probablemente, á enormes cantidades de energía residentes en los átomos y moléculas bajo formas desconocidas, estos elementos de los cuerpos aparecen dotados de la propiedad de atraerse de diversos modos, ó sea provistos de afinidad, cohesion, atraccion universal etc. El mecanismo en virtud del cual se producen estos efectos, permanece hasta hoy en la más completa oscuridad.*

2.^o *Ciertas cantidades de energía que los cuerpos reciben y desprenden fácilmente bajo la forma de energía calorífica, produciendo efectos opuestos á las atracciones moleculares, determinan el estado (sólido, líquido, gaseoso etc.) en que las referidas masas se presentan interin retienen dichas cantidades (calor latente) de energía.*

3.^a *El volúmen de los cuerpos, la tension de los gases y otros diversos fenómenos son asimismo debidos á energía comunicada á las moléculas, generalmente bajo la forma de calor, que las mismas trasforman ó emplean en trabajos.*

4.^a *En las moléculas residen además otras cantidades variables de energía correspondientes á los fenómenos sonoros, eléctricos, á la temperatura del cuerpo, etc.*

5.^a *Cada forma física de la materia corresponde á un cierto estado mecánico de las moléculas, que sin destruir el equilibrio del conjunto, ó las condiciones de existencia del mismo, permite y hasta determina movimientos de tales particillas componentes, que se traducen en propiedades características de los estados de los cuerpos.*

B—Para formar juicio sobre lo intrincado y difícil de la concepcion de la constitucion dinámica de los cuerpos, recuérdense las nociones de fuerza y de energía que en otro lugar (**5** y **6**) expusimos. Bien que la inteligencia se anonada ante la infinidad de movimientos, velocidades, y trasformaciones que hacen inconcebible la vertiginosa *agitacion* interna á que son debidas, por ejemplo, esa *trasparencia y aparen-*

te tranquilidad de una brillante gota de rocío que descansa entre los pétalos de una flor.

Los cuerpos y lo desmesuradamente pequeño se presentan, pues, á nuestra imaginacion, tan mecánicos, tan complicados y tan infinitos, como las nebulosas y las inmensidades de los mundos á la de un astrónomo cuando con su anteojo sondea la bóveda celeste en una noche despejada de invierno.



CAPÍTULO V.

GRANDES UNIDADES DE LA FÍSICA.

PLAN DE EXPOSICION DE LA ASIGNATURA.

38— La reseña sintética de las grandes verdades conquistadas y de los problemas aún no resueltos que forman el objeto de los anteriores capítulos, solo exige el planteamiento franco de la cuestion de la *unidad* ó de la diversidad de la materia, para que sea posible ensayar una clasificacion racional de los diversos fenómenos á cuyo estudio vamos á consagrarnos hecha desde la cúspide de los conocimientos referentes á la Física y sin más trabajo que el de tender la vista por el campo de lo bien establecido y experimentalmente comprobado.

39—A— Hora es pues de que abordemos la contestacion de estas preguntas. ¿Hay una sola materia? ¿O los cuerpos simples son representaciones ó manifestaciones de otras tantas clases de sustancia?

B— Aunque la contestacion está dada de antemano por nuestra parte desde el momento en que establecimos (**11-A-a**) la division de las formas de la materia en químicas y físicas, vamos á examinar sin embargo el asunto con entera imparcialidad.

Siquiera la costumbre, ciertos prejuicios, algo, en fin, poco lógico y hoy no permitido por el rigor del método, hagan pasar á los ojos de muchos la idea de la unidad de la materia como un atrevido supuesto que intenta destruir ó al ménos quebrantar un concepto sólidamente basado, el de la diversidad de materias, lo cierto es que los partidarios de uno ú otro modo de ver defienden pura y simplemente una hipótesis.

Descansa el concepto de la pluralidad de materias en el

hecho de no haber sido posible por ningun medio físico ni químico la descomposicion de los cuerpos simples; y en la constancia con que donde quiera y siempre aparece cada uno de estos caracterizado por cierto conjunto de propiedades.

Pero la Química ha descubierto la existencia de diversos modos de presentarse los cuerpos simples, llamados *estados alotrópicos*, en cada uno de los cuales la misma sustancia posee propiedades muy diferentes; la de compuestos que, siéndolo de los mismos elementos y en igual proporcion de estos, no tienen absolutamente nada de comun en sus propiedades; y la de otros compuestos que funcionan químicamente como los simples. Y aunque puede objetarse que las formas alotrópicas son poco estables, en cambio no hay facilidad de alterar un cuerpo compuesto de modo que se convierta en otro completamente diferente, aunque de la misma composicion.

Añadamos que las cantidades de energía de que la ciencia dispone son tan limitadas, que aun no se ha conseguido producir ciertos efectos, como la fusion del carbono, mucho más fáciles probablemente, ó realizables con ménos cantidad de energía, que la descomposicion en partes de los átomos de los cuerpos simples.

Aventurar, pues, bajo la base ántes indicada la idea de la existencia de muchas *materias* distintas, es crear una hipótesis tan atrevida, por lo ménos, como la de la unidad de la sustancia de los cuerpos, y, sin disputa, ménos racional; porque colegir de la diferencia de propiedades de los simples la diversidad de la materia que los forma es pensar en abierta contradiccion con la existencia indiscutible, evidenciada sobre todo por la Química orgánica, de cuerpos dotados de propiedades muy distintas á pesar de estar constituidos por los mismos elementos.

Además, ciertos fenómenos de excepcional importancia en razon á su carácter mecánico (sobre los cuales ya hemos llamado la atencion), como la igual velocidad con que los cuerpos caen, se conciben perfectamente en el supuesto de que la materia sea una.

C—En definitiva, hipótesis por hipótesis, nos decidimos resueltamente en favor de la de la unidad, que armoniza mucho mejor con esa sublime y maravillosa sencillez con que la natura-

leza realiza la variedad inmensa por medio de la unidad en todas sus manifestaciones.

40—A—Desde estos altos puntos de vista á que hemos llegado, *la unidad de la materia, la de la fuerza, y cierta simpatía por la idea de que la materia y la energía no son diferentes*, vamos á descender al detalle del estudio de la Física hecho con un criterio completamente positivo; porque no olvidamos, como dice Babinet, que *el secreto de los descubrimientos de la ciencia moderna es sencillamente que esta no ha buscado sino lo asequible á nuestros medios de experimentacion, y si desde hace pocos años ha encontrado tanto, es porque desde hace pocos años no ha buscado sino lo que es posible encontrar.*

B—Los principios de la conservacion de la materia y de la energía, y el de la equivalencia de las formas de esta última son verdades firmes de las cuales se puede partir: las restantes grandes ideas de que dejamos hecho mérito deben considerarse como atisbos de la ciencia, hipotéticos en más ó ménos grado; como concepciones destinadas á encadenar multitud de fenómenos al objeto de constituir teorías científicas y de dirigir la investigacion hácia los ideales que parecen más probables en el estado actual de nuestros conocimientos.

* **41—A**—La atraccion y la elasticidad, fuerzas naturales que son causa de tan importantes y numerosos fenómenos dentro y fuera del planeta Tierra, constituirán nuestro primer objeto de estudio: el mecanismo del sistema solar, las relaciones de posicion de las moléculas, el sonido, la luz etc.; figuran entre los hechos que tienen su razon de existencia, más ó ménos totalmente, en la atraccion y en la elasticidad; fuerzas que además deben conocerse desde el primer momento, por la circunstancia de que siendo acompañantes inseparables de las masas y de las partes constitutivas de éstas no pueden ménos de ejercer una influencia modificadora sobre todos los fenómenos que en las mismas se verifican.

B—A continuacion haremos el estudio de las formas físicas de la materia, tanto con objeto de esclarecer lo referente á ciertas fuerzas moleculares, cohesion, tension etc., como principalmente con el de conocer, en cuanto de notable ó característico ofrezcan los estados de los cuerpos ó se revele por el contacto de unas formas con otras, el sujeto en que tienen lugar los fenómenos todos del universo.

C—El sonido, el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo, en cuyo estudio se extienden de un modo notable los tratados de Fí-

sica, constituyen grupos importantes de fenómenos que en esencia no son sino hechos, con apariencias varias, de perturbacion de la cantidad de energía en determinados cuerpos ó partes de una masa; casos particulares en los cuales es más ó ménos conocido el mecanismo natural en virtud del que se verifican así la acumulacion como la disipacion subsiguiente de la energía en todos sentidos.

Atentós á este modo de ver, dividiremos para su estudio el total de los fenómenos aludidos de un modo algo diferente del ordinariamente acostumbrado.

Por lo general son acumulaciones de energía en las masas los fenómenos á que nos referimos, y sirva de ejemplo el hacerse sonora una campana, ó el calentarse el agua, ó el electrizarse por frotamiento una barra de lacre; pero tambien se presentan hechos debidos á casos de disminucion de la energía en los cuerpos; razon por la cual, dependan de aumento ó de disminucion, estudiaremos agrupados todos los fenómenos que se relacionan con tales perturbaciones y tienen lugar en los cuerpos donde las mismas se verifican.

D—Las formas físicas de la materia, aire, éter etc., inmediatas y que rodean á los focos ó centros de variacion de la cantidad de energía, sufren desde luego las consecuencias de la tendencia de esta á repartirse con igualdad en el universo, y ofrecen fenómenos, como la propagacion del sonido, las interferencias de la luz, ó la difusion de la electricidad, que se verifican dentro de dichos medios envolventes; ó como la reflexion del calor, la refraccion del sonido, la descomposicion de la luz etc., que tienen lugar merced á la intervencion de otros cuerpos colocados á modo de obstáculos interruptores del gradual y ordenado procedimiento que en cada caso constituye el mecanismo de la diseminacion de la energía: con todos ellos formaremos otro grupo de estudio ó parte del libro.

E—Por último, las interesantes relaciones entre estos conjuntos de fenómenos y las trasformaciones de movimientos ó cambios de forma de la energía de que los mismos ofrecen notabilísimos ejemplos, se prestan á un estudio de importancia trascendental, así teórica como práctica, el más propio para servir de remate á un tratado de Física moderna: estos asuntos constituirán la materia de los capítulos finales de nuestro libro.

* 42—El plan de exposicion de la asignatura que dejamos bosquejado no satisface á nuestros ideales ni representa otra cosa que un punto de vista, correspondiente al grado actual de adelantamiento de la Física, bajo el cual doblémos sistemáticamente á la ciencia; pero que nosotros mismos seremos los primeros en abandonar tan pronto como nuevos descubrimientos vayan aclarando el mar de lo

desconocido, desde cuyas orillas se miran en conjunto los fenómenos para constituir sintéticamente el edificio del saber.

Tal es además, como dice Berthelot, *el destino de todo conocimiento humano; ninguna obra teórica es definitiva; los principios de nuestros conocimientos se transforman y los puntos de vista se renuevan por incesante evolución.*



TRATADO ELEMENTAL DE FÍSICA.

PRIMERA PARTE.

LIBRO II.

ATRACCION.—ELASTICIDAD,

INTRODUCCION.

En conformidad con su título consagramos este libro, segundo de la primera parte de nuestro *Tratado de Física*, al estudio de la atraccion universal y de la elasticidad.

Dividido al efecto en dos capítulos, exponemos en el primero unas ligeras nociones sobre la gravitacion, teniendo en cuenta que tal estudio es más propio de la Astronomía; y de una manera detallada lo referente á la gravedad, en razon á ser peculiar de la Física el conocimiento de este asunto. El segundo capítulo comprende el estudio de la elasticidad ensayada por presion, y en los sólidos mediante los procedimientos especiales, torsion etc., terminando con un importante párrafo dedicado á examinar el estado de movimiento interno que se produce en aquella parte de las masas elásticas donde tiene lugar la deformacion, así como á esclarecer el mecanismo del notable fenómeno de la propagacion de las deformaciones á través de las formas físicas de la materia.

La atracción universal y la elasticidad son las dos formas de la energía que más influencia ejercen en todos los fenómenos físicos, y de que dependen principalmente el mayor número de los que hemos de estudiar: tienen el carácter común de que ambas establecen relaciones de posición entre masas, astros ó moléculas; no habiendo sido posible hasta ahora transformar una en otra, ni ninguna de las dos en las restantes formas de la energía, calor, electricidad etc.; diríase, si cupiera una comparación entre las formas de la energía y las de la materia, que las dos fuerzas de que nos ocupamos, así como la afinidad, la cohesión, la adhesión y la viscosidad son á modo de cuerpos simples por lo estables, mientras las restantes energías se asemejan á las demás inestables formas de la materia.

En razón á la importancia que concedemos á que los alumnos saquen de las aulas ideas y no memoria de hechos, recomendamos el repaso de los cinco capítulos del libro primero después de terminado el estudio de cada uno de los que componen nuestro *Tratado Elemental de Física*.



CAPÍTULO I.

ATRACCION UNIVERSAL.

§ I.—GRAVITACION.

43—Ya dejamos dicho (**14—B-c**) que los cuerpos, sean cuales fueren su masa y naturaleza, tienden á precipitarse unos sobre otros como si existiera una fuerza que, partiendo de los átomos ó moléculas, tuviese por efecto atraerlos entre sí á todas distancias; y que se llama gravitacion á esta accion atractiva en el caso de que las masas en presencia sean las de los astros que pueblan el espacio.

44—A—Las leyes de la gravitacion, descubiertas por el inmortal Newton, son las siguientes:

1.^a *La atraccion de los cuerpos es directamente proporcional á las masas.*

2.^a *Dicha fuerza varía en razon inversa de los cuadrados de las distancias.*

* **B**—De estas dos leyes se deduce por el cálculo que un cuerpo esférico compuesto de capas concéntricas homogéneas atrae como si toda la masa estuviera reunida en su centro; de modo que la direccion de la atraccion de tal esfera sobre un punto material pasaría necesariamente por el centro de la misma.

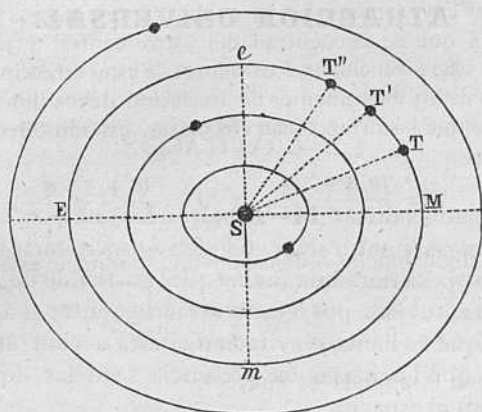
45—A—El admirable descubrimiento de Newton tuvo por base el conocimiento de las tres leyes que rigen los movimientos planetarios en el sistema solar, llamadas generalmente leyes de Kepler en memoria del gran geómetra que con tanta sagacidad supo deducirlas de multitud de observaciones astronómicas hechas por él mismo y por Tyco-Brahe.

1.^a *Los planetas describen elipses en uno de cuyos focos está el sol.*

2.^a *Las áreas TST', T'ST''... descritas por un radio vec-*

tor trazado desde el centro del sol al del planeta, (Fig. 26), son proporcionales al tiempo: á tiempos iguales corresponden, por

Fig. 26.

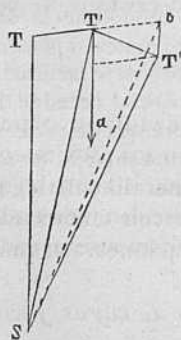


consiguiente, áreas iguales.

3.^a Los cuadrados de los tiempos de las revoluciones planetarias son proporcionales á los cubos de los grandes ejes de las órbitas.

* B.—Newton empezó por deducir de la segunda ley de Kepler que los planetas son solicitados ó atraídos por una fuerza que pasa por el centro del Sol. Sea (Fig. 27) S este centro,

Fig. 27.



y TT' un elemento infinitamente pequeño de la órbita de la Tierra, descrito por nuestro planeta en un tiempo también infinitamente pequeño. Abandonado el astro á sí mismo recorrería en igual tiempo siguiente otro elemento $T'b = TT'$; pero en el hecho de que describe una trayectoria curvilínea y recorre en el instante inmediato el elemento $T'T''$, es preciso admitir una fuerza $T'a$ que combinada con la que obra en la dirección Tb dé por resultado, según la regla del paralelogramo, el movimiento $T'T''$. La 2.^a ley de Kepler exige que los triángulos STT' y $ST'T''$ sean equivalentes; y como STT' lo es á $ST'b$ que tiene su misma base é igual altura, $ST'T''$ y $ST'b$ serán por necesidad equivalentes; pero nótese que la recta ST' es

base comun de estos dos triángulos, luego la igualdad consiguiente de las alturas supone que la recta $b T''$ es paralela á la $T'S$, ó lo que es lo mismo que $T'a$ se confunde con $T'S$. La direccion de la fuerza que atrae al planeta pasa, pues, por el centro del Sol.

Llamemos ahora a y a' á las atracciones ejercidas por el Sol sobre dos planetas cuyas masas sean m y m' ; y representemos por d y d' las distancias á que se encuentran del astro central y por t y t' los tiempos de sus revoluciones. Los valores de estas atracciones ó fuerzas centrípetas de los movimientos de traslacion de los dos astros, en el supuesto de que las órbitas sean circulares, estarán (Mec.) dados por las fórmulas

$$a = \frac{m 4 \pi^2 d}{t^2} \quad \text{y} \quad a' = \frac{m' 4 \pi^2 d'}{t'^2};$$

de las que, dividiéndolas ordenadamente, se obtiene esta otra:

$$\frac{a}{a'} = \frac{m d t'^2}{m' d' t^2};$$

y como segun la segunda ley de Kepler

$$\frac{t'^2}{t^2} = \frac{d'^3}{d^3} \quad \text{tendremos} \quad \frac{a}{a'} = \frac{m d d'^5}{m' d' d^3} = \frac{m d'^2}{m' d^2}$$

fórmula que comprende las dos leyes de la gravitacion.

46.—Conviene no olvidar que la atraccion de las masas es mútua, de modo que no sólo la Tierra atrae á la Luna ó el Sol á la Tierra, sino que la Tierra á su vez es atraida por su satélite y atrae ella misma al Sol.

47-A—Las leyes de Newton son universales, ó al ménos todos los movimientos astronómicos hasta ahora observados, se verifican con arreglo á ellas.

* **B-a**—Los enunciados del n.º 44 pueden comprobarse fácilmente en el caso de la Luna, nuestro satélite, que describe al rededor de la Tierra una órbita poco diferente de una circunferencia de radio R igual á 60 veces el del planeta, ó sea de $60 \times 6.360.000$ metros, en un tiempo T de 27.32 días, ó sea en 2.360.580 segundos. El valor de la fuerza centrípeta de este movimiento, supuesto circular, apreciado por el de su aceleracion expresada en metros, resultará sustituyendo en la fórmula (Mec.)

$$a = \frac{4 \pi^2 R}{T^2}$$

en lugar de R y T los números antedichos; hecho lo cual y efectuadas las operaciones indicadas se obtiene para a un valor 3600 veces

menor que el de la aceleracion de la gravedad en la superficie de la Tierra: pero como 3600 es el cuadrado de 60, aparece con toda evidencia que la atraccion terrestre, variando en razon inversa del cuadrado de la distancia, es la fuerza centrípeta del movimiento lunar de revolucion.

b—No cabe, pues, duda ni de la exactitud de las leyes de Newton, ni de que la atraccion que mueve, ó hace caer, los cuerpos terrestres hácia nuestro planeta y los mantiene adheridos al mismo, es la fuerza que se deja sentir en la Luna y la retiene en la órbita que describe alrededor de la Tierra.

§ II.—GRAVEDAD.

1.º—Caida de los cuerpos.

48-A—Tan luego como un cuerpo separado de la superficie terrestre queda libre, la atraccion le obliga á descender hasta que la costra sólida del globo impide el movimiento ó *caida*. Y aunque la atraccion varía en razon inversa del cuadrado de las distancias, como en los casos ordinarios de caida de cuerpos el camino recorrido, ó sea la diferencia de distancias al centro de atraccion terrestre entre el punto en que empieza la caida y el en que cesa, es muy pequeño, la experimentacion no puede apreciar en el movimiento la influencia de los consiguientes é insignificantes cambios de valor de la atraccion, y los cuerpos descienden al parecer como si estuvieran sometidos á una fuerza constante en direccion é intensidad.

B—Dedúcese de esto que, además de las circunstancias que hemos reconocido (**14-B-c**) en el movimiento debido á la atraccion terrestre, á saber que la velocidad de caida es independiente de la naturaleza y de la magnitud de las masas, los cuerpos descenderán segun las leyes del movimiento uniformemente acelerado; toda vez (Mec.) que las fuerzas constantes en direccion é intensidad producen semejante movimiento. Las leyes de la caida de los graves serán pues:

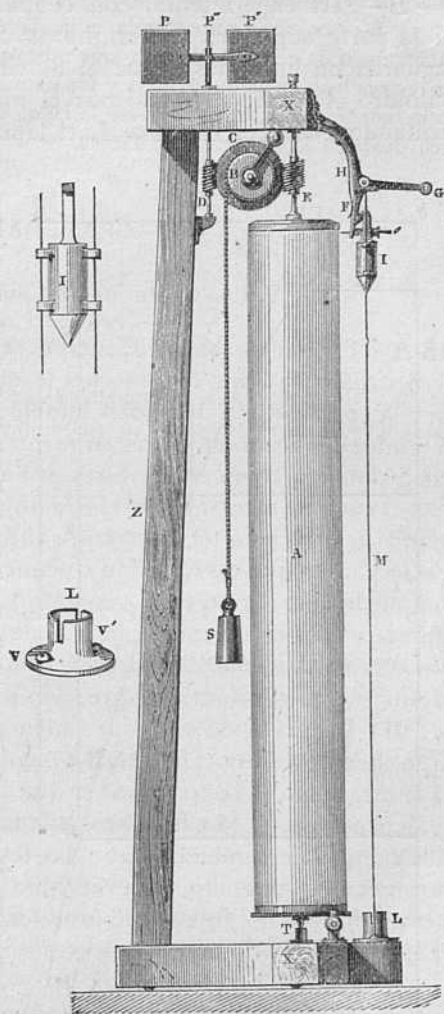
- 1.^a *Las velocidades adquiridas por un cuerpo durante la caida son proporcionales á los tiempos.*
- 2.^a *Los espacios recorridos son proporcionales á los cuadrados de los tiempos empleados en recorrerlos.*

49-A—Entre los varios medios experimentales discurridos para demostrar las leyes de la caída de los cuerpos, uno de los mas sencillos y exactos es la máquina de Morin.

Consiste (Fig. 28) en un cilindro vertical *A* que gira con gran libertad alrededor de su eje; está sostenido por unos piés de madera de dos ó más metros de longitud, y pueden sobreponérsele fácilmente hojas de papel cuadrículado: un cuerpo *I* de hierro, provisto de un lápiz *o* descende á voluntad, guiado por dos alambres, á lo largo del cilindro, trazando en el papel que lo recubre una recta vertical cuando *A* se halla en reposo é *I* cae, ó una circunferencia si el cuerpo *I* está sujeto y el cilindro en movimiento de rotacion.

En la parte superior del aparato existe un torno *B*, cuya rueda engrana con el eje de *A* y con el de un molinete *DP''*, de tal modo que cuando aquella gira, merced á la caída del peso *S* atado al extremo libre de la cuerda del torno, pone tambien en rotacion al cilindro y al molinete. El objeto de esta pieza *D P'' P P'* es

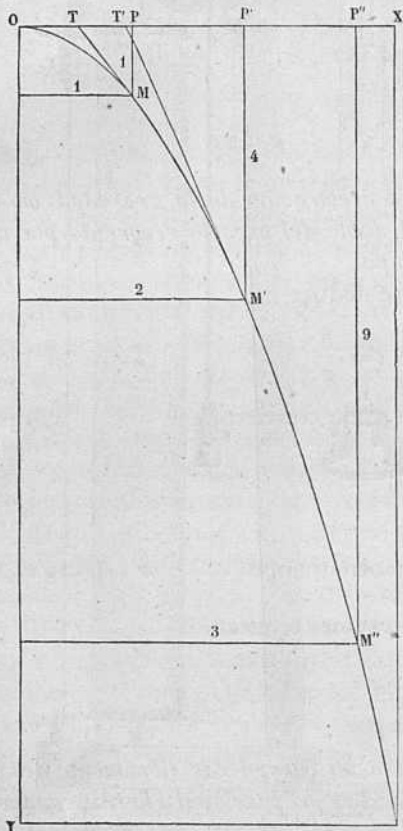
Fig. 28.



hacer uniforme el movimiento de A , que sin ella sería acelerado como producido en definitiva por el descenso de S ; efecto debido á la resistencia creciente que el aire opone á las paletas del molinete desde que este empieza á girar.

B—Para experimentar con el aparato se sube el cuerpo I á la parte superior; se permite la caída del peso S , y se aguarda un poco hasta que el movimiento subsiguiente del cilindro A quede regulado por el molinete ó sea uniforme: soltando entónces la masa I , el lápiz adherido á la misma

Fig. 29.



trazará sobre el papel sobrepuesto á A una línea resultado de la combinación del movimiento uniforme del cilindro y del variado con que descende I ; y extendiendo la hoja sobre un tablero (Fig. 29), se puede comprobar fácilmente que dicha línea OM'' es una rama de parábola y el eje de esta la vertical OY : los espacios OP, OP', OP'' , representan tiempos como 1, 2, 3...; y las rectas $PM, P'M', P''M''$, cuyas longitudes, indicadas por la cuadrícula del papel, aparecen en la relación de los núms. 1, 4, 9, 16..., marcan lo descendido por el cuerpo I durante dichos intervalos de tiempo.

Y como sabemos (Mec.) que el movimiento parabólico es producido por el sistema de una fuerza instantánea y otra constante, ó sea por la combinación de un

movimiento uniforme (rotacion del cilindro) con otro uniformemente acelerado, resulta que este último será el movimiento de caída de I , ó, lo que es lo mismo, que la gravedad obra sensiblemente como una fuerza constante.

No cabe, pues, duda alguna de que las leyes ántes consignadas (48-B) son las del descenso de los graves.

50-A—Las fórmulas (Mec.) del movimiento uniformemente acelerado serán aplicables á la caída de los cuerpos; llamando, pues, v á la velocidad, g á la aceleracion de la gravedad, e al espacio y t al tiempo, tendremos

$$v = g t \quad (1) \qquad e = \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

Haciendo $t=1$ resultará

$$e = \frac{1}{2} g \quad \text{ó} \quad g = 2 e \quad (3)$$

es decir que *el valor de la aceleracion de la gravedad en la superficie de la tierra es el doble del espacio recorrido por un cuerpo en la unidad de tiempo.*

B—De la ecuacion (1) se deduce

$$t = \frac{v}{g};$$

valor que sustituido en la (2) la convierte en

$$e = \frac{1}{2} g \frac{v^2}{g^2} \quad \text{ó} \quad e = \frac{v^2}{2 g};$$

de donde

$$v = \sqrt{2 g e} \quad (4); \quad \text{y en otro tiempo} \quad v' = \sqrt{2 g e'};$$

comparando estas dos expresiones tendremos

$$\frac{v}{v'} = \frac{\sqrt{2 g e}}{\sqrt{2 g e'}} = \frac{\sqrt{e}}{\sqrt{e'}} \quad (5)$$

fórmula que dice que *cuando un cuerpo cae libremente desde una cierta altura, su velocidad es proporcional á la raíz cuadrada del espacio recorrido y en cada momento está representada por la raíz cuadrada del doble producto de la aceleracion por el espacio.*

2.º—Dirección de la gravedad.

51-A—La trayectoria rectilínea que describe un cuerpo al caer, representa indudablemente la *dirección* de la fuerza de gravedad productora del movimiento; y sabido es que dicha

Fig. 30. línea, llamada *vertical*, se determina

en cualquier paraje de la Tierra por la *plomada* (Fig. 30) ó hilo á plomo, aparato que consiste en una masa m sujeta al extremo de un hilo délgado, fijo por su otro extremo o .

Se prueba además que la dirección SG del hilo (Fig. 31), una vez quieta la plomada, es la de la gravedad, considerando que si esta fuerza G obrase en otra dirección oblicua R , forzosamente se descompondría, según la ley del paralelógramo, en una componente que actuando en la dirección G se destruiría con la resistencia del hilo, y

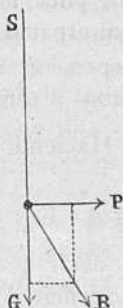
en otra normal P cuyo efecto sería poner á la plomada en movimiento cierto que no se observa.

* **B**—La rotacion de la Tierra no cambia la dirección de la caída de los cuerpos, siempre que el espacio recorrido sea poco considerable; pues cuando una masa desciende de muy alto, como la circunferencia del punto de partida es sensiblemente mayor que la del de llegada al suelo, no puede verificarse la ley de independencia de movimientos (Mec.) y el grave se separa hácia el Este: el cálculo y la experimentacion han demostrado que la desviacion correspondiente á una caída de 150 met. viene á ser unos 27 mm.

C—La línea vertical es perpendicular á la superficie de las aguas tranquilas, llamada *horizontal*, ó sea á la superficie de la Tierra; y como esta tiene aproximadamente forma esférica, resulta que la dirección de la plomada representa la de uno de los rádios de nuestro globo. De lo cual se deduce: 1.º Que dos plomadas estarán siempre, más ó menos exactamente, en un plano: 2.º Que dos verticales próximas pueden ser miradas como paralelas, pues el ángulo que forman en el centro de la Tierra (á 6.360.000 metros de la superficie) carece de valor

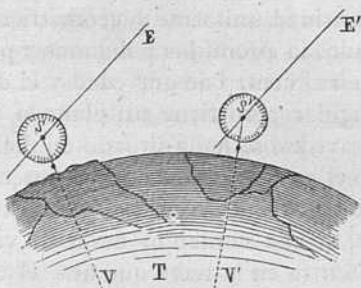


Fig. 31.



apreciable. 3.º Que cuando dos plomadas están muy distantes (Fig. 32), las verticales correspondientes SV y $S'V'$ forman un ángulo que puede medirse observando la diferencia de los VSE y $V'S'E'$ constituidos por cada una de ellas y las visuales SE y $S'E'$ dirigidas en el mismo instante desde los puntos de suspensión S y S' de las plomadas á una estrella fija.

Fig. 32.



3.º—Centro de gravedad.

52-A—Los cuerpos pueden ser considerados respecto de la gravedad cual si cada uno estuviera sometido á un sistema de tantas fuerzas paralelas é iguales como número de átomos ténga, en razón á que la atracción terrestre parece obrar individualmente sobre dichas últimas partecillas; bajo cuyo supuesto debemos ver en el peso de una masa cualquiera, ó sea (**21-D-b**) en la cantidad de atracción con que es solicitada para caer hácia la Tierra, una resultante paralela á las componentes, vertical por lo tanto, é igual á su suma; y llamaremos *centro de gravedad* al punto de aplicación de tal resultante.

B—Un cuerpo no varía de peso, según esto, aunque se le pulverice, deforme ó cambie de estado, etc., mientras *su cantidad* de masa, ó número de átomos, permanezca constante.

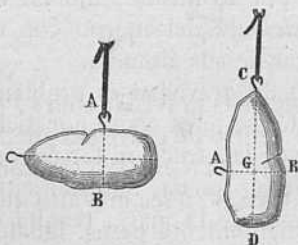
Y el centro de gravedad, que será un verdadero *centro de fuerzas paralelas* (Mec.), estará, por lo mismo, fijo en un punto, sean cuales fueren *las posiciones* del cuerpo con tal que no sufran alteración las relativas de sus átomos.

53-A—El conocimiento del centro de gravedad es problema que reviste frecuentemente gran interés, pues como por dicho punto invariable pasa la resultante de la atracción terrestre, é impedida la caída del mismo, el cuerpo queda, naturalmente, sostenido cual si no existiera el resto de la masa, resulta en definitiva que para los efectos de dicha fuerza cada cuerpo puede suponerse reducido á su centro de gravedad.

B—La determinación teórica del centro de gravedad es en la mayor parte de los casos un problema de Geometría que el cálculo resuelve con ayuda de la Mecánica. En los cuerpos de densidad uniforme y geoméricamente regulares, como el círculo, la esfera, los polígonos y poliedros regulares etc., coinciden el centro de gravedad y el de la figura; si la forma no es regular pero tiene un plano ó eje de simetría, el centro de gravedad se halla situado en dicho eje ó plano; en el triángulo el punto en cuestión pertenece á la recta que une un vértice con el medio del lado opuesto, y está á los dos tercios de la misma contando desde el vértice; en el tetraedro se encuentra en la recta que une el centro de gravedad de la base con el vértice opuesto, á la cuarta parte contando desde la base, etc. Los procedimientos de determinación del centro de gravedad ofrecen algunas complicaciones cuando las superficies ó volúmenes son irregulares, y en los casos de no homogeneidad del cuerpo; semejantes problemas se resuelven sin embargo, de ordinario, apelando á una división ideal de la figura en partes cuyo peso y centro de gravedad sean fáciles de establecer, y pasando del conocimiento de estas resultantes parciales al del valor y posición de la resultante final, cuyo punto de aplicación es el centro de gravedad buscado.

El centro de gravedad de un anillo está en su centro geométrico; el de dos cuerpos separados, aunque en relación, como la Tierra y la Luna, puede hallarse asimismo en un punto de la recta que los une donde tampoco haya masa alguna; mas por esta circunstancia el centro de gravedad no pierde ninguno de sus caracteres.

Fig. 33.



La determinación experimental del centro de gravedad podrá hacerse en muchos casos operando de la manera siguiente: se suspende el cuerpo por medio de una cuerda (Fig. 33) en dos posiciones distintas; se marca la dirección que á través de la masa lleva cada una de las dos verticales indicadas por la cuerda, y como, una vez quieto el cuerpo suspendido, el centro de gra-

vedad debe hallarse en cada una de estas rectas, según hemos visto (51-A) al hablar de la plomada, evidentemente será el punto de intersección de ambas.

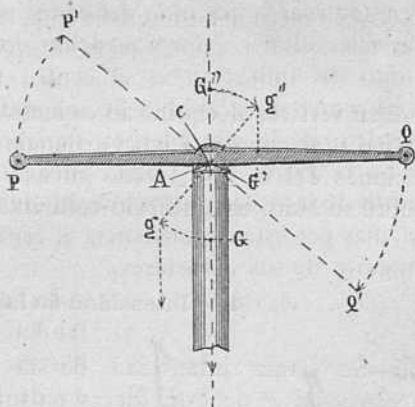
54-A—El reposo relativo que resulta para un cuerpo cuando el centro de gravedad está sostenido ó apoyado se llama *equilibrio*.

Para impedir la caída del centro de gravedad es indispensable que la vertical del mismo, que contiene á la resultante de la gravedad, se confunda con la cuerda de sosten, cuando el cuerpo se halla suspendido; ó pase por el punto ó recta de apoyo, cuando descansa sobre una recta ó punto; ó caiga dentro de la base de sustentación ó línea que une los puntos más exteriores de contacto del cuerpo con su apoyo, cuando el cuerpo descansa sobre muchos puntos. Satisfecho esto, el equilibrio se verifica si la cuerda ó el apoyo tienen la suficiente resistencia para destruir el peso del cuerpo.

B—La situación del centro de gravedad ejerce una influencia grande en la naturaleza del equilibrio. Su-

pongamos (Fig. 34) una palanca PQ de primer género y brazos iguales (Mec.) en longitud y peso, atravesada en su medio por un prisma triangular de acero C , cuya arista inferior A , descansando sobre un plano ó muesca de acero ó ágata, sirve de apoyo á la barra; la simetría del aparato respecto de

Fig. 34.

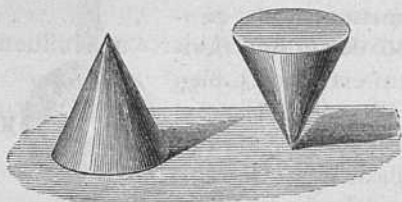


la vertical GG' exige que la resultante de la gravedad sobre PQ se confunda con GG'' ; siquiera el centro de gravedad pueda estar en G ó sea más bajo que el apoyo A , ó en G' ó sea confundándose con la arista de apoyo; ó en G'' ó sea más alto que A ; sobre todo adicionando convenientemente pesos iguales á los extremos P y Q de la palanca. Haciendo girar á PQ hasta que se coloque en $P' Q'$, como la posición del centro de

de gravedad es invariable (**52-B**), si se encuentra en G vendrá á g ; si en G' ó sea en A , continuará en el mismo sitio; y si en G'' , pasará á g'' ; solo que, dada la tendencia á caer de tan importante punto, en el primer caso el descenso de g obligará á la palanca á volver de $P' Q'$ á PQ y el equilibrio de la barra se llama *estable*; en el segundo la palanca podrá conservar la posición $P' Q'$ porque el centro de gravedad no sale del apoyo, y el equilibrio de la misma se llama *indiferente*; y en el último la caída de g'' apartará cada vez más á PQ de la posición primitiva y el equilibrio se llama *inestable*.

C—Para que uno ú otro estado de equilibrio se presente, no es condición indispensable que el centro de gravedad ocupe respecto del apoyo las posiciones que acabamos de ver. Basta que cuando se mueve el cuerpo su centro de gravedad

Fig. 35.



suba, para que el equilibrio sea estable, como se observa (fig. 35) en un cono recto apoyado por la base; si al mover el cuerpo su centro de gravedad desciende, según acontece en un cono que se sostiene sobre su vértice, el equilibrio es inestable; y si el centro de gravedad se encuentra á igual distancia del apoyo en todas las posiciones del cuerpo, como sucede cuando el cono descansa sobre su lado, el equilibrio será indiferente.

sobre su vértice, el equilibrio es inestable; y si el centro de gravedad se encuentra á igual distancia del apoyo en todas las posiciones del cuerpo, como sucede cuando el cono descansa sobre su lado, el equilibrio será indiferente.

4.º—Intensidad de la gravedad.

55—Se llama intensidad de la gravedad al valor de la *aceleración* g de esta fuerza en un paraje cualquiera de la Tierra.

La fórmula (**50**-(3)) $g=2e$ parece invitar á la determinación directa de g , midiendo el espacio recorrido por un grave en descenso durante un segundo y duplicando la cifra encontrada; pero las dificultades para llevar á cabo semejante operación con exactitud son tan grandes que se ha creído preferible abordar la cuestión por otro camino indirecto.

56-A—*Péndulo* es el aparato destinado á medir la intensidad de la gravedad; se aplica asimismo á otros usos importantes como la regulacion de los relojes, la demostracion del

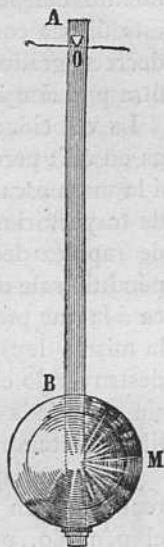
Fig. 36.



movimiento de rotacion de la Tierra, la determinacion de la densidad del planeta y de las masas de las montañas, la medida de ciertas fuerzas, etc., y en razon á ello vamos á hacer del mismo un estudio algo circunstanciado.

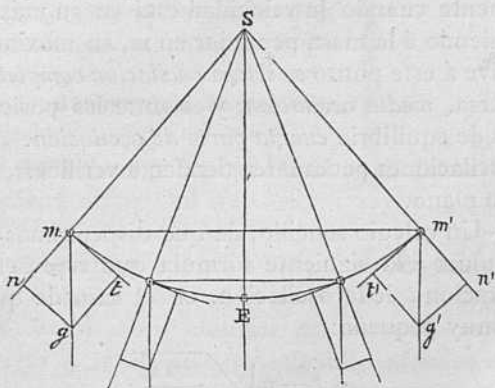
El péndulo puede ser *simple* ó *ideal* y *compuesto*. El primero consistiria en un punto material pesado, suspendido por un hilo inextensible y sin peso, y es una concepcion prácticamente irrealizable. El segundo está reducido á una masa regularmente pesada, pendiente, bien (Fig. 36) de un hilo flexible sujeto por su otro extremo *O*, bien de una varilla metálica *BA* (Fig. 37) apoyada sobre un plano de ágata por medio de una cuchilla de acero *O*, ó colgada de una lámina delgada de acero.

Fig. 37.



B-a—Llevando un péndulo desde la posicion vertical de

Fig. 38.



equilibrio *SE* (Fig. 38) á otra oblicua *Sm*, la gravedad destrui-

da en la primera por la resistencia del hilo, se descompondrá en la segunda, de conformidad con la regla del paralelogramo, en dos fuerzas de las cuales sea resultante; la mn directamente opuesta al hilo mS , y la mt que determinará el movimiento del péndulo hácia la posición media SE : el valor de esta última componente es máximo en m , cero ó nulo en E y decrece gradualmente, como indica la figura, desde una á otra posición del péndulo.

La velocidad adquirida impide que el instrumento se detenga en SE ; pero como la resistencia del hilo tampoco permite á la masa escapar segun la prolongacion del último elemento de trayectoria, se producirá en definitiva un movimiento Em' de rapidez decreciente, en razon á que tan pronto como el péndulo sale de la posición vertical aparece una fuerza, idéntica á la que produjo el descenso mE , de valor creciente segun la misma ley con arreglo á la cual disminuyó la mt , que irá destruyendo el movimiento Em' , y que, en resúmen, dada la simetría de la figura á un lado y otro de la posición de equilibrio, detendrá el instrumento cuando Em' sea igual á mE .

Obsérvese que desde m' los mismos fenómenos, aunque realizados en sentido inverso, tendrán lugar hasta m ; y que el péndulo, por consiguiente, adquirirá un movimiento de *vai ven* ú *oscilatorio* con todos los caracteres de los de *vibracion*: la fuerza alternativa que lo produce tiene su valor máximo en m y m' , donde la velocidad es nula, y vale cero en E , precisamente cuando la velocidad está en su máximo.

Suponiendo á la masa pendular en m , su movimiento hasta que vuelve á este punto se llama *oscilacion completa*; hasta m' , ó vice-versa, *media oscilacion*; y el entre las posiciones extremas y la de equilibrio *cuarta parte de oscilacion*.

Las oscilaciones pendulares tienden á verificarse siempre en el mismo plano.

b—Un cálculo sencillo, de que dispensamos á los alumnos, conduce á la siguiente fórmula que representa el valor de la duracion t de la oscilacion, en el caso de que la amplitud sea muy pequeña:

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

l es la longitud del péndulo simple, y g la intensidad de la gravedad en el paraje del experimento. Traducida esta expresión al lenguaje ordinario, se obtienen los cuatro enunciados generalmente conocidos bajo el nombre de leyes del péndulo.

1.^a *La duración de las oscilaciones es independiente de la naturaleza de la masa pendular.*

2.^a *Asímismo lo es de la amplitud. Las oscilaciones de un péndulo en cada lugar de la Tierra serán, por consiguiente, de igual duración ó isócronas.*

3.^a *Dicha duración es directamente proporcional á la raíz cuadrada de la longitud del péndulo.*

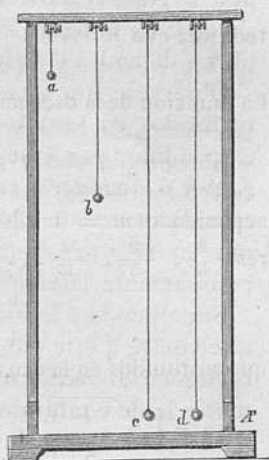
4.^a *Está en razón inversa de la raíz cuadrada de la intensidad de la gravedad.*

* **C**—La demostración experimental de las tres primeras leyes se verifica por medio del aparato representado en la fig. 39, que consiste en cuatro péndulos formados por esferas de igual radio suspendidas de hilos flexibles, dos c y d de la misma longitud, pero de diferente masa, y tres a , b , c , cuyas longitudes son 1, 4 y 9 respectivamente; estos péndulos, aunque compuestos, satisfacen, en cuanto es posible, las condiciones del simple. Los experimentos se realizan con auxilio del cronómetro de segundos (10-E).

Que el valor de t es independiente de la naturaleza de la masa se demuestra contando las oscilaciones que en igual tiempo dan los péndulos c y d : la ley del isocronismo viendo el número de dichos movimientos cuando la amplitud del arco es de 3 grados, por ejemplo, ó de dos, ó de uno; y la tercera ley se comprueba observando que el número de oscilaciones de a , b , c , en igual tiempo, está en la relación de $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$, lo que significa que su duración es como 1, 2, 3.

La cuarta ley (1), ó sea que cuando la aceleración cambia los va-

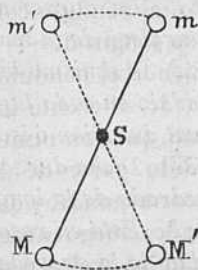
Fig. 39.



(1) El profesor Eseriche, de Guadalajara, ha inventado para esta demostración un ingenioso aparato á que llama *péndulo inclinado*: dificultades materiales ajenas á nuestra voluntad nos impiden dar una idea del mismo.

de t varían en razón inversa de la raíz cuadrada de los de g , puede demostrarse, sin salir [de cualquier paraje de la Tierra, por medio de un péndulo (Fig. 40) Mm compuesto de una varilla ligera de madera á cuyos extremos se adhieren dos grandes masas de plomo m y M , igual esta última á la primera m mas una cantidad variable p : el aparato oscila alrededor de su] parte media S . Es evidente que el sistema total, formado en realidad por dos péndulos iguales, es solicitado tan solo por el exceso de peso p de M sobre m ; y que esta cantidad p pone en movimiento á $2m + p$; luego la aceleración habrá de disminuir en la relación de p á $2m + p$ y estará dada por la fórmula

Fig. 40.



$$g' = g \frac{p}{2m + p} \quad (1)$$

toda vez que

$$(2m + p) g' = p g$$

La duración de la oscilación del péndulo SM será

$$t' = \pi \sqrt{\frac{l}{g'}} \quad (2)$$

suponiendo $m = 1$ kilóg., y asignando á p sucesivamente los valores $\frac{2}{3}$, $\frac{2}{8}$, $\frac{2}{15}$... de kilógramo, corresponderán á g' (1) los

$$\frac{1}{4} g, \frac{1}{9} g, \frac{1}{16} g$$

que sustituidos en la ecuación (2) darán para t' estos otros

$$2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad 3\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad 4\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

que demuestran la ley.

D—Cuanto dejamos consignado no es rigurosamente exacto sino en el caso del péndulo simple, y sin embargo el físico solo puede manejar los péndulos compuestos, llamados así con gran propiedad por cierto, puesto que teniendo en cuenta la constitución atómica de los cuerpos y las fuerzas de enlace entre las últimas particillas de estos, un péndulo ordinario es de

hecho un agregado ó compuesto de tantos péndulos simples como átomos forman la masa ó lenteja y el hilo, lámina ó varilla de suspension.

Las leyes que acabamos de estudiar se aplican, á pesar de todo, al péndulo compuesto sin más que establecer la nocion de su longitud.

Siendo el péndulo ordinario una reunion de péndulos simples de diferente longitud, pero que oscilan á la vez, es evidente que los puntos más próximos á la suspension habrán perdido parte de la velocidad que por la 3.^a ley (**56-B-b**) les corresponde, y que los más lejanos, por el contrario, habrán ganado; luego necesariamente existirán puntos intermedios que no se aceleren ni se retarden ó sea que oscilen cual si no estuvieran enlazados con el resto del sistema: estos puntos constituyen lo que se llama el *eje de oscilacion*, y su distancia al de suspension es la *longitud del péndulo*. Vemos, pues, que todo péndulo compuesto equivale ó representa á uno simple cuyas oscilaciones son de igual duracion; y que en virtud de ello cuanto dejamos consignado á propósito del último tiene aplicacion real en los primeros.

El eje de oscilacion goza de una propiedad singularísima que permite determinarlo fácilmente: invertido el péndulo y suspendido por dicho eje, la duracion de las oscilaciones continúa siendo la misma.

57-A—La fórmula del péndulo

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

conduce á la determinacion fácil de g , aceleracion ó intensidad de la gravedad en un paraje cualquiera de la Tierra: dicha expresion es, en efecto, igual á esta otra

$$t^2 = \pi^2 \frac{l}{g}$$

de la cual se deduce

$$g = \pi^2 \frac{l}{t^2}$$

que resuelve el problema siempre que l y t sean conocidas.

* **B-a**—El péndulo compuesto de Kater permite averiguar con

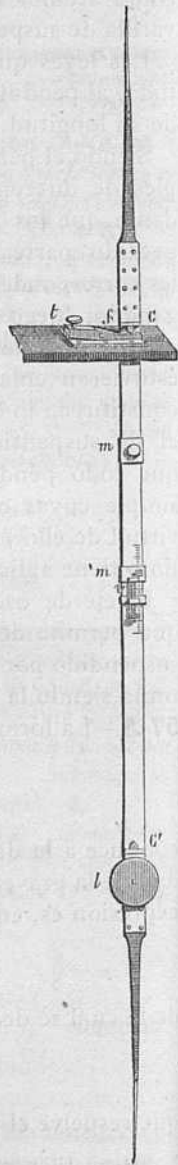
precisión su propia longitud, ó sea la del simple correspondiente, al objeto de establecer el valor de g .

Consiste dicho instrumento (Fig. 41) en una barra de latón terminada en cada uno de sus extremos por un apéndice de madera y ballena: dos cuchillas de acero C y C' perfectamente sujetas corresponden á los ejes de suspension y de oscilacion; la lenteja metálica l representa la masa del péndulo, y otras dos piezas m y m' pueden variar de posición á lo largo de la barra hasta conseguir que la duracion de las oscilaciones sea exactamente igual cuando el péndulo está suspendido de la cuchilla C ó de la C' : al funcionar el aparato la cuchilla de que está suspendido descansa sobre dos trocitos de ágata incrustados en la tableta de bronce t . La longitud del péndulo, ó sea la distancia entre las aristas que se miran de C y C' , se determina por medio de instrumentos de gran precisión; el catetómetro mismo (10-C) puede emplearse al objeto, siempre que su regla vertical sea mayor que la longitud que se quiere medir; por más que ordinariamente no se apele á él para realizar esta operacion.

b—La duracion de las oscilaciones se determina contando el número de las que el péndulo da en un cierto tiempo, y dividiendo este, expresado en segundos, por el número de aquellas. Si en lugar de un cronómetro (10-E) se dispone de un péndulo astronómico de segundos, la operacion puede llevarse á cabo por el método llamado de las *coincidencias* que nos abstenemos de describir.

58—Los resultados de algunas operaciones practicadas en diferentes puntos del globo para establecer el valor de g (intensidad de la gravedad, ó aceleracion del movimiento de caida expresada en metros, ó velocidad de un grave al cabo de un segundo, ó doble del espacio que recorre en este tiempo), están consignados en las siguientes cifras:

Fig. 41.



Valores de G.

En el Ecuador.	9.78103 met.		A 45° de latitud.	9.80606 met.
En Madrid.	9.79948		En Paris.	9.80960
En Zaragoza.	>		En el Polo (calculado)	9.83109

* **59-A**—El estudio de la influencia de la latitud, de la altitud y de la profundidad sobre el valor de g , conduce á consecuencias sumamente curiosas que vamos tan solo á apuntar.

B-a—El cuadro anterior demuestra que la fuerza de gravedad aumenta paulatinamente desde el Ecuador á los polos; y aunque esto es debido en gran parte á la fuerza centrífuga que el movimiento de rotacion de la Tierra desarrolla en un cierto grado en el Ecuador y en otros cada vez menores á medida que la latitud aumenta, semejante causa no basta para explicar el hecho, y el aplastamiento del planeta en las regiones polares aparece inesperadamente comprobado.

Hé aquí algunos datos sobre el achatamiento de la Tierra:

Radio del Ecuador.	6.377,946 metros.
Id. > Polo	6.356,859 >
Diferencia.	21,087 >
Radio medio.	6.367,400 >

Y como nuestro globo atrae cual si la gravedad estuviera condensada en su centro, y la intensidad de dicha fuerza varía en razon inversa del cuadrado de la distancia al mismo, claro es que en las proximidades de los polos, puntos más próximos al núcleo de atraccion que no los del Ecuador, se dejará sentir con mayor energía la accion de la gravedad.

b—Interesa con frecuencia conocer la longitud del péndulo cuya oscilacion dura un segundo en un paraje de la Tierra, y nada más fácil una vez averiguado el valor de g en dicho sitio: en efecto, haciendo $t = 1$ s en la fórmula del péndulo, tendremos

$$1 = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{ó bien} \quad 1^2 = \pi^2 \frac{l}{g} \quad \text{ó bien} \quad g = \pi^2 l$$

de donde

$$l = \frac{g}{\pi^2}$$

La longitud del péndulo de segundos es en el Ecuador 0^m,99103; en Madrid 0,99289; en Zaragoza.....; y en el Polo 0^m,99667.

c—La variación de g con la latitud determina un aumento en el peso absoluto de los cuerpos equivalente á $\frac{1}{568}$ al pasar del Ecuador al Polo; por más que este fenómeno no pueda ser acusado por la balanza en atención á que también las pesas experimentan á la vez el referido aumento.

C—La gravedad debe disminuir de intensidad con la altitud y así lo confirman los experimentos realizados con el péndulo en las montañas más altas del globo, por más que las diferencias observadas son, como se comprende, extremadamente pequeñas.

D—Aunque el cálculo demuestra que una superficie envolvente, como la corteza terrestre, de espesor uniforme, cuyos elementos atraigan proporcionalmente á su masa y en razón inversa del cuadrado de la distancia, no ejerce acción sobre un punto situado en el interior, los experimentos hechos con el péndulo en las profundidades de las minas prueban que la intensidad de la gravedad aumenta á medida que se desciende bajo el suelo. Esta curiosa anomalía se explica admitiendo que las capas superficiales del planeta son menos densas que las que les siguen.

APLICACIONES.

60—Como apéndice y complemento del presente capítulo vamos á dar una sucinta idea de la determinación del peso relativo de los cuerpos (operación digna de todo interés á pesar de lo vulgar de su ejecución), y del procedimiento para establecer la densidad, y la masa ó peso del planeta Tierra.

61-A—De conformidad con lo ántes expuesto (52-A) llamando M á la masa ó número de átomos de un cuerpo, g al valor de la intensidad de la gravedad, y P al peso de la referida masa ó sea á la resultante de M fuerzas paralelas é iguales, tendremos

$$P = Mg;$$

Y en el caso de otro cuerpo diferente, pero en el mismo lugar de la Tierra

$$P' = M'g;$$

fórmulas que comparadas conducen á la ya conocida (21-D-b).

$$\frac{P}{P'} = \frac{M}{M'}$$

que significa: 1.º—*La relación entre las masas de dos cuerpos es igual á la de sus pesos.*—2.º—*Cualesquiera que sean los valores de P y M , suponiendo á M' y P' constantes, la operación de averiguar los primeros respecto de los segundos, considerados como unidad, está reducida á comparar dos fuerzas paralelas y de la misma dirección P y P' .*

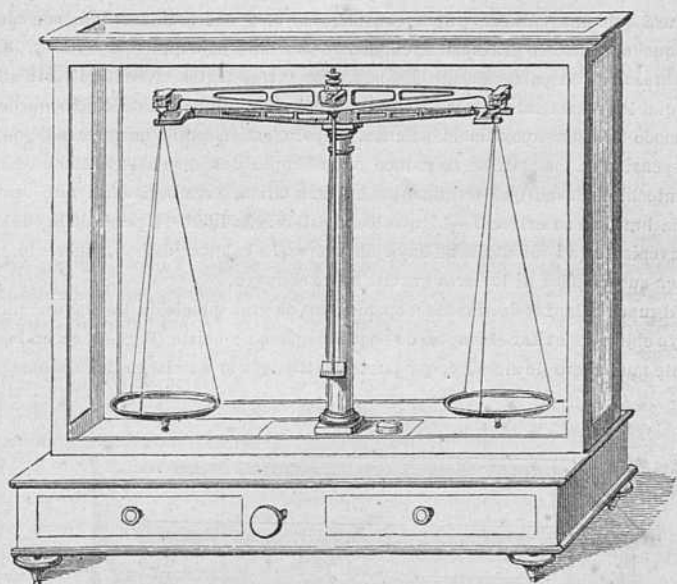
B-a—Se ha convenido en considerar como unidad de masa, ó valor constante de M , á la cantidad de materia que representa un centímetro cúbico de agua pura

á la temperatura de 4° , y al peso P^1 de la misma se le llama *gramo*; el peso relativo de un cuerpo será, pues, el número de gramos á que equivalga.

A fin de facilitar las determinaciones de pesos relativos y llevarlas á cabo con más exactitud, se han adoptado otras unidades, múltiplos y divisores del gramo, que son de todos conocidas. Estas unidades se llaman *pesas*.

b—Para comparar los pesos de los cuerpos con las pesas, háse acudido á la regla de composición de las fuerzas paralelas (Mec.), fundando en ella la construcción de una porción de aparatos llamados *balanzas, romana, básculas, etc.* 62—La balanza (Fig. 42) se compone de una palanca de primer género y brazos iguales en longitud y peso, cuyo apoyo es la arista viva de una cuchilla ó prisma de acero, que descansa sobre un trozo de ágata ó de acero más duro que el de la

Fig. 42.



cuchilla: de cada extremo de la barra pende con libertad un platillo y estos dos apéndices deben ser iguales, especialmente en peso.

El aparato así acondicionado es una masa sometida á un sistema de fuerzas paralelas verticales, que podemos considerar dividido en dos grupos formados de igual número de componentes iguales y simétricas cada dos respecto del plano vertical que pasa por la arista de apoyo, sistema cuya resultante, paralela á las componentes, estará situada en dicho plano medio y se destruirá en la resistencia del sosten de la cuchilla. El eje de la barra, ó sea la palanca ideal y rectilínea que la misma representa, se colocará, por consecuencia, horizontal-

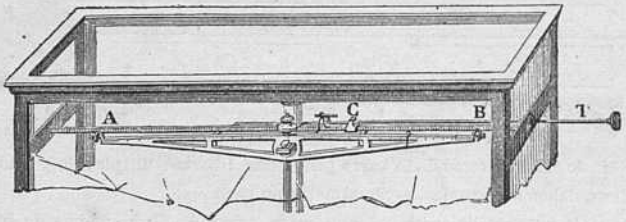
mente; y esta posición de equilibrio es indicada por una aguja llamada *fíel*, unida á la palanca, bien por la parte superior, bien por la inferior como indica el grabado. A fin de que el equilibrio del aparato sea estable, su centro de gravedad (54 B) debe hallarse más bajo que el apoyo; circunstancia que dota á la balanza de una preciosa aptitud para tender á la posición horizontal y para tomarla invariablemente siempre que su mitad izquierda pese tanto como la derecha.

Segun esto cuando coloquemos un cuerpo en un platillo y en el otro pesas equivalentes, el *fíel* de la balanza lo indicará acusando la horizontalidad de la palanca; pero si el cuerpo y las pesas no son equivalentes, como la resultante de la gravedad no pasará por el apoyo, sino que estará más próxima al platillo que más pese, la barra se inclinará hasta que el centro de gravedad se coloque por efecto del giro en el plano vertical que pasa por la arista de la cuchilla, y el aparato quede, como consecuencia, apoyado.

Para que una balanza pueda considerarse bien construida es indispensable, 1.º que el centro de gravedad se encuentre *poco* más bajo que el apoyo.—2.º que los brazos de la palanca sean largos, lijeros y resistentes en sentido vertical.—3.º que los rozamientos estén disminuidos todo lo posible; á este objeto obedece el modo de estar apoyada la palanca, y para satisfacer la misma condicion la suspensión de los platillos se reduce á un simple descanso del gancho interiormente biselado en que terminan, sobre una arista viva horizontal que ofrece cada brazo en su extremo —4.º que los platillos sean lijeros; á pesar de lo cual es conveniente que mientras no haya de usarse la balanza dichos adherentes no estén suspendidos ni la barra gravite sobre el apoyo.

Algunas balanzas destinadas á operaciones de gran precisión llevan una pieza cuyo objeto es evitar el empleo de pequeñas pesas: consiste (Fig. 43) en un montante muy lijero de alambre, que puede ser trasladado á lo largo del brazo de pa-

Fig. 43.



lanca con ayuda del tirador TC: segun sea su distancia al apoyo así el peso de esta pieccecita adicional equivale, como se comprende, á más ó ménos pesas añadidas al platillo; de modo que marcando una division adecuada en la barra AB puede acabarse de afinar una pesada sin echar mano de las pesas más pequeñas.

Siempre que haya sospechas de que la balanza tiene algun defecto debe hacerse aplicacion del *método de las dobles pesadas*, que se practica colocando en un platillo

el cuerpo cuyo peso relativo se desea conocer, equilibrando la balanza con arena ó perdigones echados en el otro platillo y sustituyendo despues en el primero el cuerpo por pesas.

• 63—La masa y la densidad del planeta Tierra están relacionadas por las expresiones (21-C)

$$M = V \times D \quad (1) \qquad D = \frac{M}{V} \quad (2)$$

suponiendo al astro perfectamente esférico, su volumen V , ó $\frac{4}{3} \pi R^3$, siendo el rádio R igual á 6.367. klm. 400, valdrá

$$1.083,160.000,000 \text{ klm. cúbicos } \text{ ó } 1.083,160.000.000 \times 10^{12} \text{ decimet. cub.}$$

Cifra que sustituida en las fórmulas (1) y (2) las convierte en estas otras

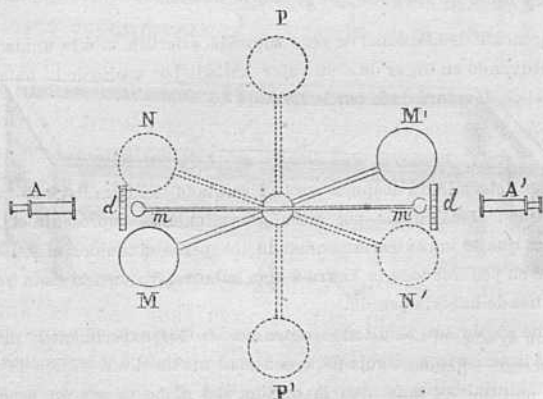
$$M = 1.083,160.000,000 \times 10^{12} \times D \quad (3); \qquad D = \frac{M}{1.083,160.000,000 \times 10^{12}} \quad (4)$$

que nos dará una de las dos cantidades M ó D siempre que sea conocida la otra.

• 64—Maskelyne, Huntton y Playffer llegaron por vez primera á establecer que la densidad media de la Tierra es próximamente cinco veces mayor que la del agua, partiendo de la desviacion de la vertical que la plomada experimenta en las inmediaciones de las montañas á causa de la atraccion de las masas de estas; pero el procedimiento de Cavendish, de que vamos á dar una sucinta idea, se considera como más perfecto.

La Fig. 41 representa la proyeccion de las partes más importantes del aparato empleado al objeto, llamado *balanza de Cavendish*: una regla de abeto lijera y

Fig. 44.



bien homogénea, de cuyos extremos penden las pequeñas piezas iguales m y m' , está suspendida del techo de una habitación por medio de un alambre

muy fino sujeto al centro de $m m'$: dos grandes esferas de plomo M y M' de 158 kilogramos cada una descansan sobre un mecanismo situado en el suelo de la habitacion, pero al que puede imprimirse desde el exterior un movimiento de giro merced al cual dichas dos masas tomen las diversas posiciones que el grabado representa y todas las intermedias.

Cuando las dos esferas M y M' se colocan en direccion PP' perpendicular á $m m'$, no ejercen accion alguna sobre estas pequeñas masas y debe procederse á fijar la posicion de equilibrio de mm' por medio de las dos chapas de marfil graduadas d y d' . Trayendo despues las esferas á M y M' la atraccion de M sobre m y de M' sobre m' , que se hace sensible desde cierta distancia, obliga á girar á la regla mm' hasta que la torsion del alambre de que esta pende contraresta dicha fuerza, en cuyo momento se establece otra posicion de equilibrio. Las observaciones deben hacerse desde el exterior de la habitacion por medio de anteojos A, A' .

Determinada préviamente la fuerza de torsion del hilo, la operacion anterior conduce al conocimiento del valor de la atraccion de las grandes esferas sobre las pequeñas á una cierta distancia; cantidad que dividida por dicha distancia y por el peso de las esferas ofrecerá como cociente una cifra indicadora del valor de la atraccion a que la unidad de peso ejerce sobre m á la unidad de distancia.

Este mismo cociente puede ser obtenido por otro órden de consideraciones. El peso p de la esferilla m representa la atraccion de la masa total de la Tierra á la distancia $R = 6.567.400$ metros del centro: luego, en virtud de la 2.^a ley de Newton, á la unidad de distancia tendremos

$$\frac{p}{a} = \frac{1^2}{R^2} \quad \text{de donde} \quad a \text{ (atraccion á la distancia 1)} = p R^2;$$

llamando M á la masa ó peso total del planeta,

$$a = \frac{p R^2}{M}$$

será la atraccion de la unidad de peso sobre la esferilla m á la unidad de distancia. Sustituyendo en lugar de a su valor hallado por medio de la balanza de Cavendish, el de M estará dado por la fórmula

$$M = \frac{p R^2}{a};$$

y el de D se determinará despues por la fórmula (4) del núm. 63

La cantidad M calculada por estos procedimientos representa el número de kilogramos que se encontrarían sumando los pesos obtenidos si se llevara sucesivamente en pedazos toda la Tierra á una balanza, volviendo cada porcion á su sitio despues de haberla pesado.

El promedio de los resultados obtenidos en los experimentos más precisos realizados hasta la fecha arroja para densidad media de la Tierra la cifra 5,5: y como los materiales que forman la corteza del globo tienen un peso específico medio comprendido entre 2 y 3, aparece demostrado que en el interior del planeta existen sustancias más densas que en la superficie, segun en otro lugar (59-D) dejamos apuntado.

CAPÍTULO II.

ELASTICIDAD.

§. — LEYES EXPERIMENTALES.

1.º—Cuerpos isótropos: presion y traccion.

65—El problema general de la elasticidad, especialmente en el caso de los cuerpos sólidos, es uno de los más complejos que al físico pueden ofrecerse.

Dada, sin embargo, la índole de los dos cursos de nuestra asignatura á que el presente libro está destinado, y los conocimientos de matemáticas que los alumnos traen á ambas cátedras, no es posible abordar el estudio de la elasticidad estableciendo una teoría de la misma á la que solo contribuya la experimentacion dando algunos coeficientes numéricos; razon por la cual habremos de limitarnos á poco más que consignar hechos ó leyes experimentales fáciles de comprobar é interpretar.

66-A—Ya hemos indicado (**14-B-a**) que la compresion es el procedimiento general para producir deformaciones ó cambios de posicion de las moléculas en todas las formas físicas de la materia; y que los líquidos, los gases y el éter son perfectamente elásticos, presentándose tan solo en los sólidos la persistencia en más ó ménos grado de las deformaciones. Por manera que, aun estudiado el asunto bajo el punto de vista experimental, el caso más general que podemos someter á exámen es el de un sólido, ó no sólido, que se conduzca sensiblemente como elástico, que además ofrezca igual elasticidad en todos sentidos, ó sea *isótropo*, y en el que provoquemos una perturbacion interior sacando de la posicion de equilibrio, por *presion*, unas cuantas de sus moléculas.

B—Wertheim ha demostrado que si se comprime una barra en sentido de su longitud por ambos extremos, se acorta una cantidad idéntica á la que se alargaría haciéndola sufrir una *traccion* igual á dicha compresion; y que en uno y otro caso vuelve el cuerpo igualmente á recobrar su forma tan pronto cesa el esfuerzo.

Lo que nos indica que si en los líquidos y en los gases solo por compresion podemos estudiar la elasticidad, en los sólidos somos dueños de hacerlo por tal procedimiento ó por traccion, toda vez que ambas elasticidades son idénticas.

67-A—Las leyes de la elasticidad, deducidas en el caso de la traccion de barras sólidas y referentes á la variacion de una sola de sus dimensiones, son las siguientes:

1.^a *El aumento de longitud de una varilla ó alambre es proporcional á la carga á fuerza tensora; ó, lo que es lo mismo, cualquiera que sea el estado de tension de una varilla, un nuevo esfuerzo tractor produce siempre igual efecto.* Resultado importante, porque las prolongaciones son la suma de los aumentos de distancia de las diversas capas moleculares y como el esfuerzo tensor es igual á la fuerza atractiva que se desenvuelve entre ellas, parece en definitiva que esta fuerza varía proporcionalmente á las distancias de las moléculas.

2.^a *Los aumentos de longitud son proporcionales á la longitud de las varillas ó alambres;* es decir que si un peso suspendido de un alambre de un metro produce en el mismo un alargamiento A , el mismo peso aplicado á otro alambre de la misma sustancia y diámetro, pero de dos metros lo alargará $2A$.

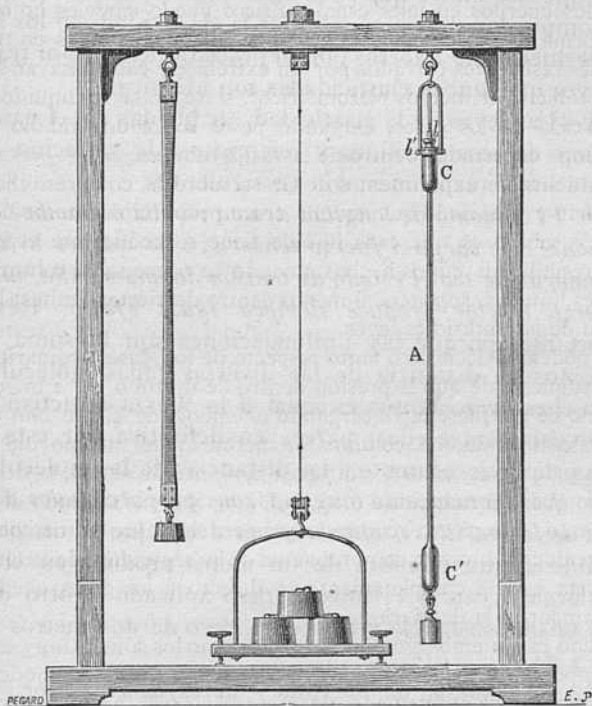
3.^a *En igualdad de longitud y de esfuerzo tensor, las variaciones de longitud están en razon inversa de las secciones:* ley fácil de preveer, porque repartiéndose igualmente la fuerza entre todos los elementos de la seccion, si esta es doble y aquella no varía, el resultado es el mismo que si se tratara de dos secciones mitad sometidos á la mitad de esfuerzo tensor.

4.^a *Cada sustancia, en igualdad de las restantes condiciones, posee una desigual facilidad para comprimirse ó alargarse, que se presta al establecimiento de un coeficiente numérico propio y característico de cada sólido.*

* **B**—La comprobacion experimental de estas leyes se verifica por

medio de alambres sujetos por un extremo, uniéndoles en el otro un platillo (Fig. 45, centro) donde colocar pesas. Debe cuidarse de no echar al principio sino la carga necesaria para que el alambre pierda sus flexiones y aparezca recto; una vez conseguido lo cual se pone el platillo en descanso sobre el pié del aparato con ayuda de tres tornillos que forman parte del mismo, y se añaden los grandes pesos

Fig. 45.



que han de hacer el papel de fuerzas tensoras, procediendo despues á levantar los tornillos para dejar nuevamente al aire el alambre. Las longitudes se miden con el catetómetro (10-C), á cuyo efecto los hilos ó varillas llevan hácia sus extremos dos señales ó puntos de mira, que la figura indica aunque poco perceptiblemente.

No creemos oportuno entrar en detalles operatorios referentes á la comprobacion de cada una de las cuatro leyes, como tampoco en la descripción de los experimentos de Wertheim encaminados á demostrarlas por compresion, es decir, cuando las longitudes disminuyen en vez de aumentar.

* **C**—En el caso de los líquidos y en el de los gases no existe paridad de circunstancias para que se den los anteriores enunciados, ni para plantear su investigación.

Desde luego es preciso apelar á la presión como único medio de producir deformaciones; pero en este camino tropezamos con la movilidad y escasa compresibilidad de los líquidos, y con la expansibilidad y con la ley de Mariotte en los gases.

A los cuerpos en tales estados físicos puede dárseles no obstante una forma parecida á alambres sólidos, introduciéndolos en tubos de paredes resistentes cerrados por un extremo; y cabe ensayar su compresión bien por medios piezométricos, si se trata de líquidos, bien, en el caso de los gases, cargando pesos sobre un émbolo que los mantenga encerrados dentro de la vasija tubular.

Los delicados experimentos de Grassi sobre la compresibilidad del agua han evidenciado que aquella crece proporcionalmente á la presión; y sabido es que cada líquido tiene su coeficiente especial de compresibilidad; cuyos hechos, cuando se opere sobre columnas tubulares líquidas, suponen, al ménos dentro de ciertos límites, la reafirmación de las anteriores leyes.

No podemos decir otro tanto respecto de los gases ordinarios: pues en el supuesto de que la presión dentro de un tubo de 1 m. de altura lleno de gas fuese 0,76, cargando el émbolo de cierre con un peso equivalente al de una columna de mercurio del mismo diámetro y de una, dos, tres, cuatro etc. veces 0,76 mt. de altura, la del gas en el tubo quedará reducida á 0,50, 0,33, 0,25 etc., habiendo disminuido 0,50, 0,66, 0,75 etc., contra la primera ley. Experimentos análogos conducen á cierta comprobación de la segunda y de la tercera; y la cuarta estaría completamente en defecto si los gases obedecieran exactamente á la de Mariotte.

Bueno es sin embargo observar que como los sólidos muy estirados se rompen y muy comprimidos se deforman, á veces al modo de los líquidos; y estos resisten enérgicamente á las más fuertes presiones sin reducirse de volumen en cantidades de alguna importancia, y los gases propenden á liquidarse bajo la influencia de la presión, en definitiva como las variaciones de dimensiones de donde nos proponemos inducir el conocimiento de la elasticidad se verifican en los cuerpos y dicha fuerza es más bien propia de las moléculas, no son de extrañar las dificultades que los hechos experimentales presentan y las contradicciones á que llevan.

Más adelante veremos otros medios distintos de la presión y la tracción, y de más valor indudablemente, fundados en el movimiento vibratorio de los cuerpos, para abordar la cuestión de la elasticidad.

* **D-a**—Llamando P á la fuerza ó peso tensor, L á la longitud de la

varilla ó alambre, S á su seccion y E á un coeficiente propio de la sustancia, la variacion l de longitud estará expresada por la fórmula

$$l = E \frac{PL}{S} \quad (1)$$

de donde

$$\frac{l}{EL} = \frac{P}{S} \quad \text{ó bien} \quad \frac{P}{S} = \frac{1}{E} + \frac{l}{L}$$

El cociente $\frac{P}{S}$ es la fuerza tensora que obra sobre la unidad de superficie, y el $\frac{l}{L}$ el alargamiento ó la contraccion de cada unidad de longitud; representando al primero por f y al segundo por a tendremos

$$f = \frac{1}{E} + a \quad (2)$$

b—La constante E se llama *coeficiente de compresibilidad lineal*; y es la variacion l de longitud en el caso (1) de que los elementos geométricos L y S del alambre sean iguales á la unidad y el peso tensor P valga asimismo uno.

La constante $\frac{1}{E}$, inversa de la anterior, recibe el nombre de *coeficiente de elasticidad* y es el peso ó fuerza tensora f (2) que obra sobre la unidad de seccion de un alambre, cuando a es igual á uno, ó bien $l=L$, es decir en el caso de que el alambre duplique de longitud porque se prolongue una cantidad igual á la suya propia. Observemos que esta definicion no se funda en la experiencia, puesto que es imposible alargar una barra hasta tal extremo sin romperla; razon por la cual alguna vez se adopta como coeficiente de elasticidad *la prolongacion de una varilla cuya longitud sea igual á la unidad, sometida á la fuerza tensora de un peso igual al suyo propio.*

Ordinariamente se toma el metro como unidad de longitud, el kilogramo como unidad de peso, y el milímetro cuadrado como unidad de seccion.

c—Los siguientes coeficientes de elasticidad $\left(\frac{1}{E}\right)$ han sido calculados por Wertheim por medio de las leyes anteriores, operando repetidas veces con diferentes cargas y á temperaturas entre 15 y 20° sobre alambres recocidos:

Plomo	1727	klg.	Platino	15518	klg.
Oro	5584	»	Acero inglés	17278	»
Plata	7140	»	Acero fundido	19561	»
Cobre	10519	»	Hierro	20794	»

Aunque estas cifras no representan ningun hecho experimental de elasticidad, como están calculadas segun los resultados de observaciones practicadas miéntras las varillas ó alambres se conducen como cuerpos elásticos, tienen una significacion evidente en sentido de indicar la elasticidad de cada uno, que en definitiva es consecuencia de la influencia que la naturaleza de las moléculas y los estados de agregacion ejercen sobre la fuerza molecular.

* **68—A-a**—Pero las varillas se adelgazan á la vez que se alargan, y es interesante el conocimiento de la deformaion total realizada por la traccion, especialmente en cuanto se refiere á la relacion entre las variaciones de longitud, ó sea de una dimension, y las del volúmen, ó sea de las tres dimensiones.

b—Los cálculos de Poisson, al parecer comprobados por los experimentos de Cagnad-Latour, establecen que la *prolongacion de la unidad de longitud es numéricamente igual al doble del aumento de la unidad de volúmen*; pero los cálculos y experimentos de Wertheim conducen á admitir que lo *es al triplo*, y en resúmen solo queda sentado con evidencia que si un cuerpo se estira su volúmen aumenta (lo cual nada tiene de extraño puesto que la distancia de sus moléculas se hace mayor), quedando incertidumbres hasta sobre si la relacion entre las variaciones de longitud y de volúmen será constante para todas las sustancias, ó, por el contrario variable, como parece más seguro.

Dependiendo esta relacion de la en que se encuentran el aumento de longitud y la disminucion de la seccion, si llamamos C á lo que disminuye la unidad del perímetro de ésta, como designamos por E la variacion de la unidad de longitud, el resultado á que Poisson ha llegado está expresado por la fórmula

$$\frac{C}{E} = \frac{1}{4} \quad \text{ó} \quad E = 4 C$$

y el obtenido por Wertheim por esta otra:

$$\frac{C}{E} = \frac{1}{3} \quad \text{ó} \quad E = 3 C$$

Sustituyendo estos dos valores de E en la expresion $E-2 C$, que con un error despreciable representa la variacion sufrida por la unidad de volúmen, se llega á las consecuencias de Poisson y Wertheim.

B—Los experimentos de Wertheim, más susceptibles de precision que los de Cagnard, se realizaron de la manera siguiente: suspendió (fig. 45 izquierda), prismas cuadrangulares de cauchú y, estirándolos por medio de un peso, midió directamente las variaciones

de la longitud y de la seccion: ó bien empleó tubos de laton A sin soldadura (fig. 45 derecha), terminados por depósitos C y C', adhiriendo al C la armadura de suspension b', y al C' el peso tractor; lleno uno de estos tubos de agua y ajustado á la boca de C un tubito de vidrio b, al prolongarse la varilla así constituida el nivel de agua baja en b, acusando el aumento de volúmen y hasta permitiendo calcularlo prévia medida del descenso del agua y del diámetro del tubito.

Los resultados obtenidos sobre el cauchú así como los números siguientes, parecen confirmar la teoría de Wertheim:

	Ensayos	E-2C	$\frac{1}{3}$ E	$\frac{1}{2}$ E
Latón ..	1	0,52	0,54	0,81
	2	0,54	0,58	0,87
Cristal.	1	0,77	0,79	1,19
	2	2,44	2,70	4,06

* 69-A—Las consecuencias á que ha llegado Wertheim por la experiencia y el cálculo son las siguientes:

1.^a *Los cambios de volúmen son, como los de longitud, proporcionales á las cargas.*

2.^a *La variacion de la unidad de seccion de una barra estirada por sus dos extremos es $\frac{2}{3}$ de la variacion por unidad de longitud; ó la variacion de diámetro es el tercio.*

3.^a *Las variaciones de la unidad de volúmen son $\frac{1}{3}$ de las variaciones de la unidad de longitud.*

4.^a *Si el esfuerzo se ejerce sobre todos los puntos de la superficie, el alargamiento no es sino $\frac{1}{3}$ de lo que sería si el esfuerzo se hiciera en los extremos.*

5.^a *La variacion de la unidad de volúmen de una masa oprimida por todos los puntos de su superficie es igual á la variacion de la unidad de longitud de una barra estirada solamente en sentido de su longitud.*

6.^a *Si ejerciéndose el esfuerzo solo en los extremos, se impidiera por algun medio el cambio de diámetro, la variacion de longitud sería tan solo dos tercios de lo correspondiente al caso de poder cambiar el diámetro.*

B—Resulta de estas leyes que si se comprime ó se estira un cilindro por sus dos bases,—1.^o cuando pueda variar de diámetro: 2.^o cuando no pueda: ó bien si se ejerce el esfuerzo sobre toda la superficie, las fuerzas necesarias para obtener el mismo cambio de longitud serán como 1, $\frac{2}{3}$ y 3, ó, para una misma fuerza, las variaciones como 3, 2 y 1.

* **70 A**—El aumento de temperatura hace disminuir generalmente el coeficiente de elasticidad de los cuerpos: y las corrientes eléctricas producen momentáneamente el mismo efecto. Todas las circunstancias que aumentan la densidad de un cuerpo aumentan también su elasticidad y recíprocamente.

B—Tales hechos, y en particular el último, arrojan alguna duda sobre la exactitud de los cambios de longitud y volumen en proporción de las cargas; pues si se trata de una tracción la densidad disminuye, si de una compresión la densidad aumenta, y las variaciones en igual sentido del coeficiente se oponen á la verdad completa de la ley aludida que supone constante el valor de $\frac{1}{E}$

71—Wertheim explica los resultados anteriores admitiendo la hipótesis de que la fuerza molecular varía en razón inversa de la potencia 14^a de la distancia.

* **72**—El establecimiento de una teoría matemática de la elasticidad fundada en los precedentes hechos de experimentación, es trabajo á que no podemos llevar á los alumnos por la insuficiencia oficial de conocimientos de matemáticas que debemos suponerles; esto no obstante indicaremos la marcha elemental que sigue Jamin en su precioso *Curso de Física de la Escuela Politécnica* al exponer la teoría de la elasticidad de los sólidos, con objeto de despertar en nuestros discípulos ideas sobre el asunto, toda vez que se trata de uno de los que por su importancia más interés merecen en la Física.

De las leyes estudiadas es fácil deducir la deformación en un paralelepípedo sometido á tracciones ó á compresiones ya normales á sus tres pares de caras ya tangenciales á cualquiera de ellas. De aquí se puede pasar á la determinación de las condiciones de equilibrio de un paralelepípedo elástico ó de un tetraédro cuyas caras sean rectangulares, cuando uno ú otro estén sometidos á fuerzas cualesquiera; y finalmente admitiendo que un cuerpo elástico es un conjunto de pequeñas masas donde residen fuerzas proporcionales á las mismas y que varían de una manera continua como la distancia, basta suponer á dicho cuerpo dividido por tres sistemas rectangulares de planos paralelos para que aparezca compuesto por infinidad de pequeños paralelepípedos internos y de tetraédros superficiales, hablando en general, cuyas condiciones de equilibrio, ó sean las de un punto cualquiera del cuerpo, se establecen, dados los anteriores preliminares, sin dificultad alguna: el cálculo de las tensiones y de las variaciones de volumen no puede ser tampoco más sencillo.

Las fórmulas de la elasticidad á que así se llega son susceptibles de importantes aplicaciones.

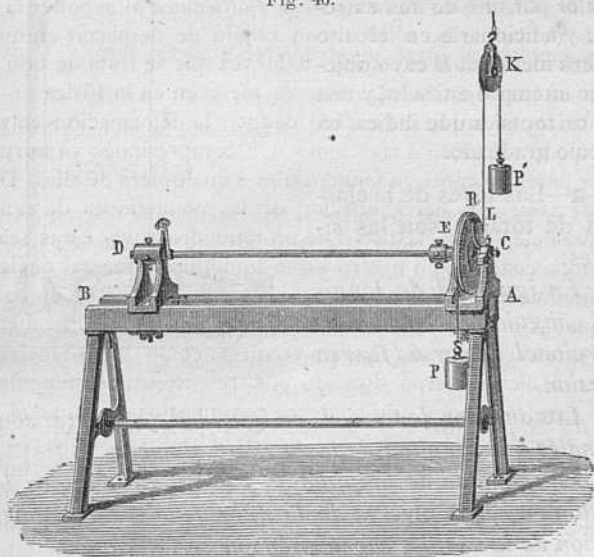
2.^a—Sólidos isótropos; torsion y flexion.

73—Además de la compresion, modo general de deformacion de los cuerpos, existen dos procedimientos especiales para el caso de los sólidos, *la torsion* y *la flexion*, de que vamos á ocuparnos brevemente, siempre en el supuesto de que se actúa sobre sustancias elásticas.

74—A-a—Labrando un sólido en forma de varilla ó alambre y sujetándole por un extremo, si se le aplica en el otro un par de fuerzas le veremos adquirir una especie de movimiento helizoidal ó retorcerse: cuando la accion del par ó sea *la torsion*, cesa, la varilla se destuerce y aun pasa de la posicion de equilibrio retorciéndose en sentido inverso y así continúa ofreciendo una série de oscilaciones, ó sean torsiones, una vez en un sentido, otra en el inverso, durante algun tiempo.

* **B-a**—Para experimentar con varillas *DE* algo recias, Wertheim emplea el aparato fig. 46: sobre un banco de fundicion *A B* muy

Fig. 46.



pesado se colocan dos grandes soportes, *D* y *C*, uno de los cuales,

D, que puede ser transportado á lo largo de la mesa y sujeto con gruesos tornillos donde convenga, sirve para coger el extremo *D* de la varilla y asegurarlo con un tornillo de presión: como es preciso que durante la torsión permanezca fija esta extremidad *D*, se adhiere á la varilla una aguja indicadora y durante los experimentos se observa si permanece, como debe, constantemente inmóvil delante de un índice fijo que forma parte del soporte. El otro extremo de la varilla está sujeto de un modo análogo: pero va unido á una polea *R* con dos pesos iguales *P* y *P'* y que obrando en sentido contrario á modo de un verdadero par de fuerzas tienden á hacerla girar. Para medir la torsión producida se traza sobre una de las caras de la polea un círculo dividido en frente del cual se coloca una alidada inmóvil como indica el grabado; y de una lectura hecha ántes de que funcionen los pesos y otra despues, se deduce el ángulo de la torsión realizada. Llamando *r* al radio de la polea y *P* á cada uno de los pesos, $2Pr$ será el momento del par ó la fuerza de torsión *F*.

b—Tratándose de alambres es suficiente para establecer las leyes de la elasticidad de torsión suspender (fig. 47) uno de estos hilos por uno de sus extremos *P*, y adicionarle en el alto una esfera metálica, *B* cuyo objeto sea mantenerlo estirado, y una aguja horizontal *a* que indica en un círculo graduado.

C-a—Las leyes de la elasticidad de torsión son las siguientes:

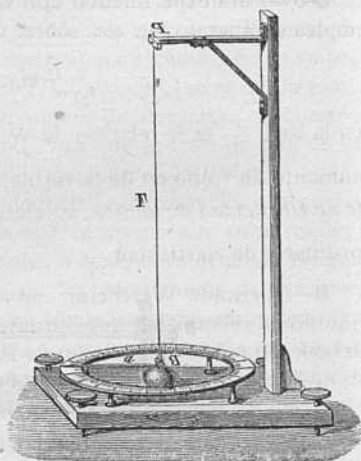
1.^a *En igualdad de longitud el ángulo de torsión es proporcional al par ó fuerza de torsión.*

2.^a *Los ángulos de torsión, en igualdad de fuerza, son proporcionales á la longitud de la varilla ó alambre.*

3.^a *En igualdad de longitud y fuerza, los ángulos de torsión están en razón inversa de la 4.^a potencia del diámetro de la sección de la varilla, suponiendo que sea circular.*

4.^a *En igualdad de todas las circunstancias las diversas sustancias se tuercen proporcionalmente al coeficiente de com-*

Fig. 47.



presibilidad lineal, ó bien á un coeficiente especial de torsion propio de cada una.

Estas leyes solo son exactas para pequeñas torsiones, sólidos muy elásticos, y varillas delgadas, en razon á cierto efecto permanente de torsion que siempre existe.

* **D**—Las leyes de torsion están comprendidas en la siguiente fórmula á que conduce el cálculo

$$A = E \left(1 + \frac{1}{3} \right) \frac{4 L F}{\pi r^4} \quad \text{ó si se quiere } A = \frac{4 E \left(1 + \frac{1}{3} \right)}{\pi} \frac{L F}{r^4}$$

que en el caso de varillas prismáticas se convierte en esta otra

$$A = 2 E \left(1 + \frac{1}{3} \right) \frac{L F}{M} :$$

A en el ángulo de torsion, *L* la longitud de la varilla ó alambre, *F* la fuerza de torsion, *r* el radio cuando el sólido es cilíndrico y *M* el momento de inercia de la unidad de longitud del prisma respecto de su eje en el caso de varillas prismáticas

La constante

$$\frac{1}{2 E \left(1 + \frac{1}{3} \right)}$$

en la cual $\frac{1}{3}$ es la relacion de Wertheim entre la prolongacion y el aumento de volúmen de la varilla, se llama frecuentemente *coeficiente de elasticidad de torsion*; y es igual, como se vé, á $\frac{3}{8}$ del *coeficiente ordinario de elasticidad* $\frac{1}{E}$.

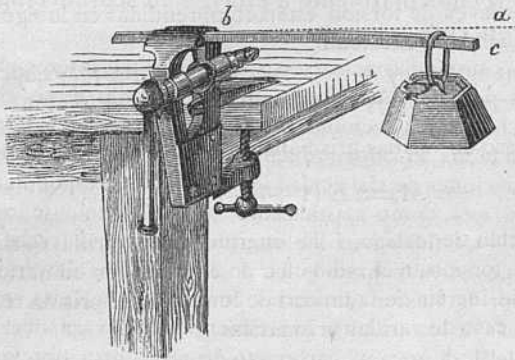
* **E**—Operando Wertheim con varillas ó tubos huecos llenos de líquido ha reconocido que durante la torsion disminuye el volúmen del cuerpo proporcionalmente á la longitud y al cuadrado de la torsion. En varillas rectangulares de igual seccion la disminucion crece rápidamente con la diferencia de los lados del rectángulo; así cuando esta diferencia es de 1 á 4 la disminucion es 20 veces mayor que en caso de lados iguales ó seccion cuadrada.

75-A—Cuando á una barra *a b* (fig. 48) sujeta por un extremo se le aplica un peso en el otro, se encorva hasta llegar á una posicion de equilibrio *b c* en que la reaccion elástica equilibra al peso. Se llama *flecha de flexion* el cambio de posicion del extremo de la barra.

B-a—Las leyes aproximadas de la elasticidad de flexion deducidas del cálculo y de la experimentacion son:

1.^a *En una misma barra la flecha es proporcional á la carga ó peso tensor.*

Fig. 48.



2.^a *A igualdad de anchura y espesor de la barra, y de carga, la flecha es proporcional al cubo de la longitud.*

4.^a *A igualdad de carga, longitud y espesor, la flecha está en razón inversa de la anchura en las barras prismáticas.*

5.^a *A igualdad de carga, longitud y anchura, la flecha está en razón inversa del cubo del espesor en las barras prismáticas.*

6.^a *En igualdad de circunstancias, las barras de diferentes cuerpos se doblan desigualmente ó tienen un coeficiente especial de flexion relacionado con el ordinario de elasticidad.*

b—Como siempre queda algo de deformación permanente, estas leyes no son exactas sino dentro de ciertas condiciones que aproximen los ensayos al caso de operarse sobre cuerpos de elasticidad perfecta.

3.^a—Elasticidad de los cuerpos anisótropos.

76-A—Hemos estudiado hasta ahora las deformaciones de los cuerpos homogéneos é igualmente elásticos en todos sentidos;

pero las sustancias cuyo modo de agregación molecular es diferente según la dirección en que se las mire, ó *anisótropas*, tienen varios coeficientes de elasticidad: así las maderas sometidas á la tracción, dan valores muy diferentes para el coeficiente según que se las deforme en la dirección de las fibras, ó perpendicularmente á estas, ó en sentido tangencial á las capas concéntricas.

* **B**—De las sustancias anisótropas, ningunas tan interesantes como los cristales por las aplicaciones que del estudio de su elasticidad se hace en el de las radiaciones, con motivo de que la materia etérea que propaga la luz, el calor radiante, etc., presenta dentro de dichos cuerpos variaciones de elasticidad idénticas y correspondientes á las del cristal ó está como cristalizada. Desgraciadamente los difíciles estudios de la elasticidad en los cuerpos anisótropos están muy retrasados; no existiendo hasta la fecha sino algunas determinaciones realizadas por la flexión de cortas barritas de selenita, mica y sal gema, además de los antiguos experimentos de Savart sobre las maderas, el cristal de roca, el carbonato de cal y otra porción de sustancias, cuyos trabajos todos conducen á la consecuencia de que tales cuerpos poseen distinta elasticidad según el sentido en que esta se ensaye, si bien es posible calcular el valor de la misma en una dirección determinada conociendo los coeficientes correspondientes á tres direcciones rectangulares, llamadas *ejes de elasticidad*, que en los sistemas cristalinos de ejes rectangulares coinciden con los cristalográficos.

§ II.—PROPAGACION DE LAS DEFORMACIONES.

77—Los hechos de elasticidad que dejamos estudiados ofrecen dos particularidades dignas de toda atención por su importancia, á saber: que no obrando la fuerza de presión, tracción, torsión ó flexión sino en algunos puntos, el efecto se deja sentir en toda la masa; y que tan pronto como cesa el esfuerzo deformador se presenta un movimiento de vaiven característico; doblando una varilla, ó retorciéndola, son perfectamente visibles los movimientos oscilatorios que siguen al fin de la acción de la fuerza, y hasta puede fácilmente medirse la duración de tales oscilaciones y ver que son isócronas.

78—Vamos á intentar explicarnos los anteriores hechos en el caso más sencillo de un alambre compuesto de una fila de mo-

lécúlas; y supongamos que M es la terminal de uno de los extre-

Fig. 49.



mos y que recibe, merced á una traccion, un impulso instantáneo en la

direccion MA .

No olvidemos que el juego de la fuerza elástica es tal que obra como fuerza atractiva al estirar los alambres, ó sea al separar las moléculas, y como repulsiva al comprimirlos ó sea al aproximar á aquellas entre sí.

De donde resulta que la velocidad comunicada á M irá disminuyendo en virtud de la atraccion elástica, hasta que, destruida por completo en A , la molécula se encuentra solo bajo la influencia de dicha atraccion y comienza un movimiento de regreso hácia la posicion M . La velocidad creciente de tal movimiento hará pasar á M de este su primitivo lugar de equilibrio; solo que entónces experimentará una repulsion de parte de la molécula inmediata del alambre y se irá deteniendo y no pasará de B , punto situado á igual distancia que A del M , toda vez que la aceleracion que la molécula ha ganado de A á M va á ser destruida por una fuerza idéntica desde M á B y por lo tanto quedará anulada en igual tiempo.

Los mismos fenómenos sucederán de B á A , como se comprende, y en resúmen podemos establecer que cuando una molécula M de un hilo elástico experimenta un cambio de posicion por traccion ó por presion, en cuanto cesa la fuerza adquiere un movimiento oscilatorio ó de vaiven, idéntico al del péndulo (56—B-a).

Aquí, como allí, se llama *amplitud de la vibracion* el espacio comprendido entre las dos posiciones extremas A y B , entendiendo por *vibracion* la oscilacion molecular; y los términos, *vibracion completa*, *media vibracion* y *duracion de la vibracion*, tienen igual significado que sus análogos en el caso de la oscilacion pendular.

El mecanismo de produccion del movimiento vibratorio, lleva consigo la consecuencia de que en cada caso la *duracion de la vibracion permanece constante, aunque varíe la amplitud*; y un cálculo sencillo, en que no es nuestro ánimo entrar, establece que dicha duracion t se halla representada por la fórmula

$$t = 2 \pi \sqrt{\frac{l}{e}}$$

siendo e la aceleración impresa á la molécula por la fuerza elástica; y como, llamando f á la fuerza elástica y m á la masa de la molécula,

$$e = \frac{f}{m},$$

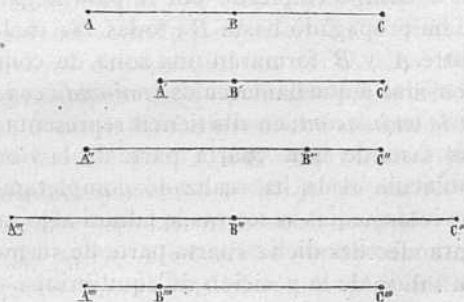
tendremos finalmente

$$t = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{f}}$$

La duración de la vibración es, pues, proporcional á la raíz cuadrada de la masa de la molécula que oscila, y está en razón inversa de la raíz cuadrada de la fuerza aceleratriz que solicita constantemente á dicha masa para volver á la posición de equilibrio: ó en otros términos, el cuadrado de la velocidad es proporcional á la fuerza aceleratriz, ó sea á la fuerza elástica del cuerpo, y está en razón inversa de la masa.

79—Veamos ahora lo que sucede en toda la fila de moléculas, y sean al efecto (fig. 50) A, B y C las tres primeras, consecutivas y equidistantes.

Fig. 50.



Supongamos que un choque, ó compresión rápida, impulsa á A en la dirección de B : conforme dejamos indicado su movimiento cesará en A' , por ejemplo, desde donde la molécula volverá á su primera

posición A'' y seguirá hasta cierto punto A''' , para comprender después su regreso á la posición de equilibrio A'''' , y así continuando: solo que en el ínterin la fuerza repulsiva que se desarrolla entre A y B , cuando ocupan las posiciones A' y B' , obligará á esta segunda molécula á moverse hasta B'' , por ejemplo; desde cuyo punto volverá rechazada á la posición de

equilibrio B''' que rebasará viniendo á B'''' : finalmente la molécula C , en el instante A'' , B'' , C'' , obedeciendo á la repulsion entre B y C , pasará á un punto C''' desde el cual habrá de regresar á su posicion de equilibrio, ó sea á C'''' , siguiendo en su vibracion las fases sucesivas de este movimiento.

De cuya explicacion se deduce: 1.º que la vibracion de la primera molécula determina igual movimiento de todas las de la fila; 2.º que no siendo instantánea la comunicacion del movimiento, la agitacion vibratoria tarda más en llegar á cada molécula cuanto más léjos se encuentra del punto primeramente conmovido; y las diferentes moléculas vibrantes no se encontrarán en el mismo instante en igual fase de la vibracion; 3.º que el fenómeno, tal como lo dejamos explicado, no sufre modificacion alguna porque supongamos entre A y B , y entre B y C , una multitud de moléculas, y consideremos al grupo $A B$ sufriendo en masa la accion del choque inicial, ó sea dirigiéndose de A á B , que es realmente lo que sucede cuando en el extremo de una barra se da un golpe de martillo.

80—La inspeccion de la figura 50 demuestra que el fenómeno de que nos ocupamos altera la densidad del hilo, toda vez que entre A' y B' , B'' y C'' etc. las moléculas están á distancias menores que $A B$ y $B C$; y entre A'' y B'' á otras mayores. Si en el tiempo empleado por A para llegar á A' , la conmocion se ha propagado hasta B' , todas las moléculas comprendidas entre A' y B' formarán una zona de compresion ó de mayor densidad á que llamaremos *semi-onda condensada* ó *cuarta parte de ondulacion*; en ella tienen representacion simultánea todas las fases de una cuarta parte de la vibracion, puesto que la molécula A la ha realizado completamente, á cada una de las intermedias sucesivas le faltará algo más que á su anterior para efectuar dicha cuarta parte de su movimiento, y la B no ha salido de la posicion de equilibrio.

Dado el mecanismo de la propagacion, la condensacion $A' B'$ irá recorriendo toda la fila de moléculas, sin que ninguna de estas en particular realice otro movimiento que uno igual á $A A'$, es decir, sin que haya traslacion alguna á lo largo del hilo, sino vibraciones moleculares realizadas progresivamente.

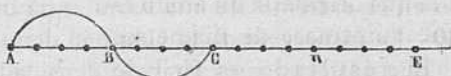
Al volver la primera molécula de A' , á A ó sea á A'' , irán si-

guiéndola todas hasta *B*, iniciándose una zona de dilatación, ó *semi-onda dilatada* en que están representadas por las posiciones simultáneas de las moléculas, todas las fases de otra cuarta parte de vibración. El reflujo ordenado y sucesivo de moléculas hácia *A* determinará una propagación de esta dilatación á lo largo del hilo, análoga á la de la condensación.

La zona dilatada se marcará más aun cuando la molécula pase á *A''*, como por el contrario reaparecerá la condensación al volver á la posición de equilibrio *A'''*; y en resumen llamaremos *condensación* ú *onda condensada* al grupo de moléculas que están realizando una misma media vibración, y *dilatación* ú *onda dilatada* al conjunto de las que verifican la segunda media vibración. La condensación y dilatación juntas componen una *ondulación*, ó zona ó grupo de moléculas que en un mismo instante ofrecen todas las fases de una vibración completa estando cada molécula en una distinta.

81—Se llama *longitud* de la ondulación la distancia entre dos moléculas de la fila que se encuentran en la misma fase de su vibración, como (figura 51) *AC* y *A'C'*.

Fig. 51.



La ondulación representa un período de tiempo exactamente igual á la duración de la vibración, y cuanto más lenta sea esta mayor será también la longitud de la ondulación y viceversa; puede, pues, sentarse que dicha longitud se halla en razón directa de la duración de la vibración, ó bien que la *velocidad de propagación del movimiento vibratorio es constante en cada sustancia*.

La fig. 51 representa este último hecho: una vibración poco rápida originará la onda *AC*; otra que lo sea más la *A'C'*; pero en resumen al cabo de un tiempo cualquiera la agitación se encontrará á igual distancia del origen en ambos casos.

82—Si la primera molécula del hilo realizara un solo vaiven, se formaría una sola ondulación que lo recorrería uniformemente en toda su longitud; mas si verifica un número indefinido de oscilaciones, toda la fila de moléculas puede hallarse á

la vez conmovida por una serie de ondas alternativamente condensadas y dilatadas.

Cuando se somete durante algun tiempo una varilla á la presion ó á la traccion constante de un peso, toda ella se constituye análogamente á una condensacion ó á una dilatacion, segun el caso; por manera que el suprimir la fuerza deformadora no puede ménos de originarse una dilatacion ó una condensacion y de seguir un cierto movimiento ondulatorio longitudinal, merced al cual la varilla se acortará y se alargará alternativamente hasta que se extinga la agitacion molecular.

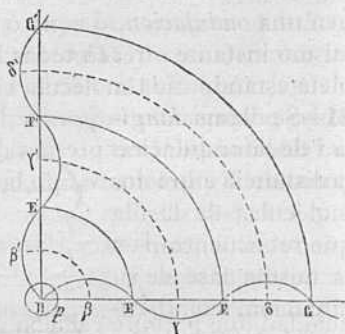
83—En lugar de un hilo molecular podemos suponer una superficie plana, isótropa, elástica en cuyo centro D (figura 52) se produjera una deformacion por presion análoga á la que originaría un anillo D que aumentase de diámetro.

El resultado es fácil de concebir, considerando á tal plano formado por infinitos rádios convergentes al centro D ; en cada uno de ellos, ó sea en cada fila radiante de moléculas, se verificaría cuanto acabamos de exponer sobre ondas lineales y el conjunto apareceria como agitado por ondas circulares alternativamente condensadas y dilatadas, que el grabado representa con líneas llenas y punteadas.

De no ser la superficie isótropa variaría la velocidad de propagacion de unos á otros filetes, y la figura de la onda plana sería elíptica ó cualquiera otra distinta de la circunferencia de círculo.

84—Una concepcion análoga, la de una esfera que sumergida en un cuerpo elástico estuviese variando de diámetro, nos permite imaginar á los medios isótropos en vibracion, como agitados por ondas esféricas concéntricas, alternativamente condensadas y dilatadas; y si el cuerpo es anisótropo por ondas elipsoidales ó de otra forma distinta de la esférica.

Fig. 52.



85—La fórmula que representa la duracion de una oscilacion

$$t = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{f}}$$

puede modificarse ligeramente en el caso de que la molécula vibrante pertenezca á un cuerpo y esté sometida, como es consiguiente, á la accion de las que la rodean; dada la proporcionalidad que, en igualdad de volúmen, existe entre las masas y las densidades, cabe sustituir una por otra, y á la vez debe observarse que f será la resultante final de las acciones elásticas que mutuamente ejercen entre sí todas las moléculas del cuerpo. Bajo cuyas indicaciones la fórmula anterior tomará esta forma:

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{D}{E}}$$

La propagacion uniforme de las ondas permite representar su velocidad por la expresion de la del movimiento uniforme: llamando L á la longitud de la onda, tendremos, pues:

$$V = \frac{L}{T} = \frac{L}{2 \pi \sqrt{\frac{D}{E}}}$$

igualdad que permite calcular dos de las cantidades conocida la tercera. Newton da la siguiente fórmula de la velocidad en el caso de los gases

$$V = \sqrt{\frac{E}{D}}$$

y Laplace obtuvo esta otra

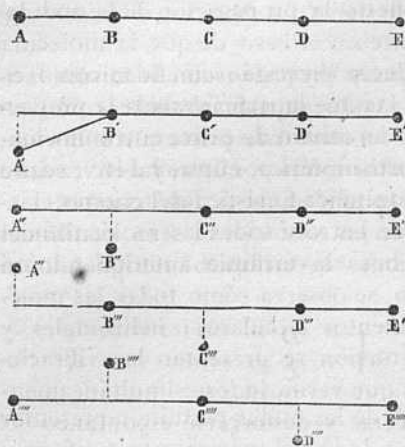
$$V = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

aplicable cuando la ondulacion se propaga á través de un líquido ó de un sólido: g es, como sabemos, la intensidad de la gravedad, y l la variacion de longitud que experimenta una columna de un metro de la sustancia en cuestion sometida á la presion ó á la traccion de un peso igual al de la propia columna.

86—Observemos que en los casos anteriores las ondas se propagan en la misma direccion de las vibraciones, ó estas

son *longitudinales*; pero si en una fila de moléculas (figura 53) *A, B, C, D, E* llevamos la *A* á *A'* por medio de un choque perpendicular ó por una acción flexora, la atracción desarrollada por la separación de *B*, llega á detener la *A* y poner en movimiento á *B*.

Fig. 53.

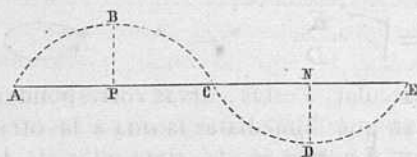


A viene luego á su primitiva posición, ó sea á *A''*; pero entonces *B'* ha llegado á *B''*. Un instante despues *A''* pasa á *A'''* en virtud de la velocidad adquirida; *B''* llega á la posición de equilibrio *B'''*, y *C''* experimenta su separación máxima viniendo

á *C'''*. *A'''*, atraída por *B'''*, sale de dicho punto y vuelve á *A''''*, estancia de equilibrio; la velocidad adquirida lleva la *B'''* á *B''''*; *C'''* llega por atracción elástica á *C''''*, y *D'''* viene á *D''''*.

87—Estas vibraciones que se verifican perpendicularmente á la recta segun la cual se propaga el movimiento, se llaman *transversales*. Imaginando moléculas intermedias entre las *A, B, C...* se formará una ondulacion, que la fig. 54

Fig. 54.



representa, correspondiente á la vibracion transversal: en ella, como vemos, no hay condensaciones ni dilataciones,

sino una curva sinuosa formada por las moléculas que realizan simultáneamente todas las fases de una vibración, en la que se distingue *elevaciones* correspondientes á las moléculas que realizan la primera media vibracion y *depresiones* producidas por las que están verificando la segunda.

Una varilla sujeta por un extremo y sometida por otro durante un tiempo apreciable á una fuerza de flexion se constituye al modo de una elevacion ó de una depresion y en

cuanto cesa la fuerza ofrece el movimiento consiguiente á la vibracion transversal de las moléculas.

Una cuerda larga atada por uno de sus cabos y sacudida por el otro, pone de manifiesto la propagacion de la ondulation lineal transversal.

Las vibraciones transversales se propagan con la misma facilidad que las longitudinales, tanto superficialmente como en todos sentidos alrededor de un centro de primera conmocion, dando origen á ondas de forma esférica, elipsoidal etc., segun la homogeneidad ó no homogeneidad elástica del cuerpo.

88—No es indispensable que las vibraciones sean rectilíneas para que los anteriores hechos se verifiquen: retorciendo un alambre fijo por un extremo, se observa cómo todas las moléculas van realizando movimientos circulares ó helicoidales, y en cuanto cesa la fuerza de torsion se presentan las vibraciones curvilíneas moleculares que verificándose simultáneamente se traducen por un torcerse y destorcerse espontáneo del alambre durante cierto tiempo.

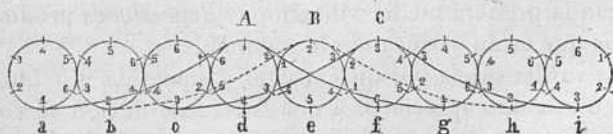
89—La superficie tranquila de las aguas ofrece frecuentemente un ejemplo de propagacion, en un plano, del movimiento vibratorio: basta arrojar una piedra á dicho líquido para que se produzca un rizo circular cuyo centro es la conmocion consiguiente, y que va agrandándose hasta las paredes del depósito.

La fig. 55 representa el movimiento de cada molécula de agua: *A* es media vibracion, *B* la otra media, y *C* la forma completa de la trayectoria molecular; á estas curvas corresponden la elevacion y la depresion que, inmediatas la una á la otra, constituyen la ondulation. La fig. 56 da clara idea de lo que sucede en un rádio de la onda circular de la superficie

Fig. 55.



Fig. 56.



del agua, en el supuesto de que la forma de la vibracion de las moléculas *a, b, c, d, e, f...*, sea circular en vez de la indicada por la letra *C* en la fig. 55.

90—Observemos, para terminar, que la propagacion de las deformaciones elásticas constituye un procedimiento natural de disipacion de la energía, toda vez que el movimiento se va extinguiendo allí donde empezó, y á medida que se extiende va comunicándose á nuevas masas, cada vez mayores en el caso general de la propagacion en volúmenes.

Asímismo insistimos en que el movimiento de traslacion de las ondas en ningun caso supone otra cosa que la vibracion de las moléculas: ya veremos en su dia qué vaivenes casi imposibles de medir por su pequeñez dan origen á ondas que corren muchos millones de metros por segundo.

Y finalmente no dejemos pasar sin ser notado el hecho de que cuando un cuerpo ó forma física de la materia esté en contacto con otro que vibre, la agitacion de este no puede ménos de perturbar el estado mecánico del primero.



TRATADO ELEMENTAL DE FÍSICA.

PRIMERA PARTE.

LIBRO III.

FORMAS FÍSICAS DE LA MATERIA.

INTRODUCCION.

Terminamos la primera parte de nuestro libro con cinco capítulos dedicados al estudio de las formas físicas de la materia; consagrando tres al respectivo de los estados sólido, líquido y gaseoso; otro, bajo el epígrafe *estados intermedios*, al conocimiento del estado pastoso ó viscosos y del líquido-gaseoso; y el final á exponer una sucinta idea de las formas *hipotéticas* materia radiante y éter, por más que los trabajos de Spottiswoode, Moulton y otros no permitan pensar definitivamente con Crookes en la existencia del estado radiante, al paso que los progresos de la ciencia van cada día connaturalizando más la idea de la realidad del éter.

El estudio de las formas físicas de la materia se encuentra

al presente tan poco adelantado, que á pesar de la multitud de hechos á que, de la manera más metódica, vamos á pasar revista, sigue desconocido el juego de las fuerzas que determinan tales modos de agrupación de las moléculas, y apenas se levanta por medio de hipótesis el velo que cubre el misterio del mecanismo del estado gaseoso, y se establecen algunos supuestos respecto de los líquidos.

Esto no obstante, como los cuerpos son teatro de cuantos fenómenos hemos estudiado y estudiaremos, el conocimiento más exacto de sus estados, por imperfecta que sea la idea que cada cual se forme de los mismos, siempre resultará de la mayor importancia.



CAPÍTULO I.

ESTADO SÓLIDO.

§ I.—FORMA Y ESTRUCTURA DE LOS SÓLIDOS.

91—A—El estado sólido es una de las formas físicas de la materia ménos conocidas, por cuyo motivo su estudio se reduce á la enumeracion de multitud de hechos que hasta el presente no han llegado á ser concebidos como consecuencias de un principio ó sea dentro de una teoría que los comprenda á todos.

B—El predominio de la cohesion en los sólidos produce como resultado inmediato cierta fijeza de las posiciones relativas de las moléculas, merced á la cual no es posible cambiar la forma ni el volúmen de tales cuerpos sin emplear (**13—B-a** y **20—B-a**) esfuerzos ó energías considerables. Los sólidos tienen, pues, *forma*, ó configuracion exterior, y *estructura*, ó configuracion interior, propias; y sobre este carácter vamos á fijar desde luego nuestra atencion.

92—A—Por regla general la superficie de los cuerpos sólidos es completamente *irregular*, constituyendo un conjunto casuístico de pequeñísimas superficies planas y curvas con poco ó ningun interés para el físico.

Pero la naturaleza ofrece con frecuencia, y el hombre puede formarlos en condiciones que por ahora no hacen al caso, sólidos cuya superficie es poliédrica ó está compuesta de cierto número de *caras* planas, que se cortan segun rectas ó *aristas*, ó segun ángulos poliédros ó *esquinas* ó *ángulos sólidos*: los cuerpos así terminados se llaman *cristales*, aunque no sean transparentes.

B—La cristalizacion es el fenómeno más interesante que ofrece el estado sólido, al par que uno de los más bellos de la

naturaleza, como lo atestiguan perfectamente los hermosos ejemplares que los mineralogistas y los químicos guardan en sus colecciones.

La variedad inmensa de formas cristalinas que la observacion acusa, puede, sin embargo, considerarse derivada de un reducido número de tipos, en atencion á estar bien comprobado el hecho de que, en un cristal, una arista ó un ángulo sólido es reemplazado fácilmente por una cara nueva que se llama de *truncadura*: ó bien una arista es sustituida por dos caras paralelas á la misma ó sea por un *bisel*; ó un ángulo sólido es reemplazado por otro de igual, ó de mitad, número de caras, cuyo fenómeno se llama *apuntamiento*.

Las figuras 55, 56 y 57 representan tres modificaciones sencillas del cubo ó exaedro regular.

C—Se llama *centro* del cristal un punto que divide en dos partes iguales toda recta que pasa por él y termina en la superficie; y *ejes*, á ciertas rectas alrededor de las cuales las caras están dispuestas simétricamente: cuando alguno de los ejes es único ó no tiene otro análogo en el cristal, se distingue con el nombre de *eje principal*, y los restantes con el de *ejes secundarios*.

Formas simples son las que están terminadas por caras iguales; y *compuestas* las que presentan caras de especies diferentes.

D—La observacion enseña que nunca se encuentran en un mismo cristal otras formas simples que las que tienen sistemas de ejes idénticos; y como por otra parte es un hecho que una misma sustancia puede cristalizar en multitud de formas simples y compuestas de igual sistema de ejes,

Fig. 57.

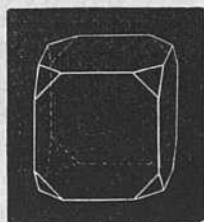


Fig. 58.

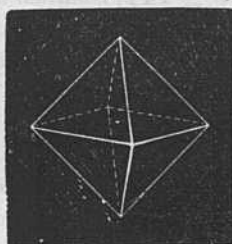
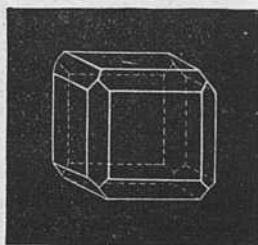


Fig. 59.



se ha convenido en llamar *sistema cristalino* á la reunion de diferentes formas que reúnen semejante circunstancia.

Los cristalógrafos han distinguido seis sistemas cristalinos, á saber:

1.º El *regular* ó *cúbico* caracterizado por tener tres ejes perpendiculares é iguales.

2.º El *prismático recto de base cuadrada* que tiene tres ejes perpendiculares, pero uno es diferente de los otros dos.

3.º El *prismático recto de base rectangular ó rómbica* cuyas formas ofrecen tres ejes perpendiculares y desiguales.

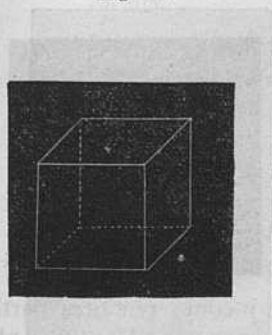
4.º El *romboédrico* cuyas caras son rombos, iguales, tiene un *eje principal* que une los ángulos triedros cuyos tres ángulos planos son iguales, y tres ejes secundarios perpendiculares al primero y que forman entre sí ángulos de 60°

5.º El *prismático oblicuo de base rectangular* caracterizado por tres ejes, de los que dos son oblicuos entre sí y el tercero perpendicular al plano de los mismos.

6.º El *prismático oblicuo de base romboidal* que tiene tres ejes desiguales y oblicuos.

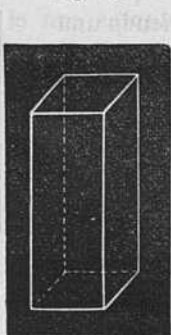
En cada uno de estos grupos las formas se deducen fácilmente unas de otras, y es claro que una forma simple de cualquiera de ellos puede ser considerada como *tipo*. Cada una de las figuras 60, 61.....65 representa el tipo de uno de los seis sistemas, pero pudieran haberse elegido con tal objeto otras formas simples como los seis octaedros correspondientes.

Fig. 60.



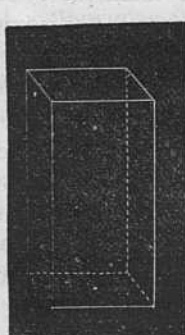
1.º sistema.

Fig. 61.



2.º sistema.

Fig. 62



3.º sistema.

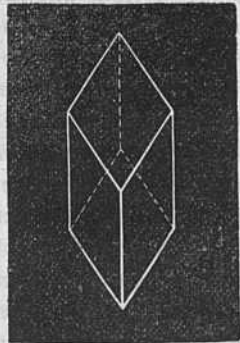
E--Todas las partes semejantes de un cristal se modifican de igual modo. Este principio tiene, sin embargo excepciones, pues á veces solo se alteran la mitad de las aristas ó de los ángulos sólidos; los cristales en que esto se verifica se llaman *hemiédricos*, distinguiéndose con los nombres de *dextro* ú *levo-hemiédricos* segun que las caras modificadoras se presenten á la derecha ó á la izquierda del observador.

F—Generalmente todas las formas simples y compuestas en que cristaliza una misma sustancia, pertenecen á un solo sistema; pero tampoco es rara la existencia de cuerpos, llamados *dimorfos*, que cristalizan en dos sistemas distintos, como el azufre, el carbonato de cal, etc.

Las sustancias que cristalizan en el mismo sistema se llaman *isomorfas*: siquiera el valor de los ángulos no sea absolutamente idéntico, es notable que los compuestos isomorfos tienen una fórmula química semejante, ofrecen con frecuencia cierta analogía de propiedades, y pueden reemplazarse en un mismo cristal sin alterar la forma de este, como lo prueban los cristales romboédricos formados por una mezcla de carbonatos que se encuentran en la naturaleza.

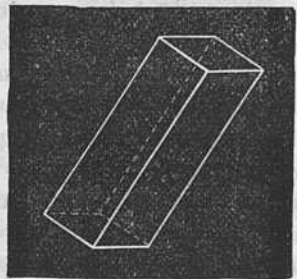
G—Los cristales tienen la propiedad de poderse fraccionar

Fig. 63.



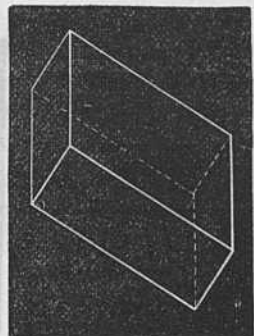
4.º sistema.

Fig. 64.



5.º sistema.

Fig. 65.



6.º sistema.

fácilmente por capas paralelas en ciertas direcciones, ó *exfoliarse*; basta de ordinario golpearles con precaucion para que aparezcan líneas que indican el sentido de las exfoliaciones; mas cuando este método no da resultado, lo produce el echar el cristal muy caliente en agua fria.

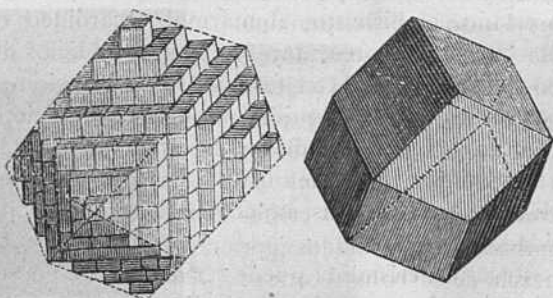
Exfoliando Hauy con una navaja en todas las direcciones posibles los cristales de diferente forma, pero de un sistema, de una misma sustancia, observó que constantemente llegaba á un núcleo interior de la misma forma; así en el carbonato de cal, cuerpo que cristaliza en más de sesenta formas, se obtiene siempre por exfoliacion un romboedro.

Tan curioso fenómeno ha servido de base al célebre mineralogista para explicar los fenómenos de la cristalización.

Supone Hauy, en efecto, que dicha forma interior, á que llama *primitiva*, es la de las moléculas constituyentes del cristal; y explica la produccion de las formas exteriores por la superposicion de capas de moléculas sobre las caras del núcleo, suprimiendo filas de estas particillas bien en los lados bien en los ángulos de dichas capas.

La fig. 64 indica cómo puede concebirse la formacion del dodecaedro romboidal, partiendo de un cubo como forma primitiva y merced al decremento continuo de una fila de moléculas cúbicas por cada lado de las capas, ó bien superponiendo capas de moléculas cúbicas á cada una de las que falte una

Fig. 66.

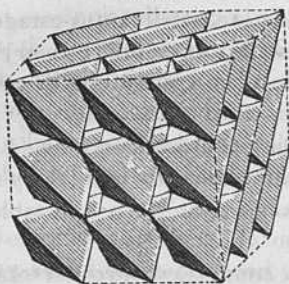


fila por cada lado respecto del número de filas de la capa inferior.

Delafosse ha completado la teoría de Hauy admitiendo principalmente que la molécula cristalina integrante de dicho sabio no es la verdadera molécula física; sino que se halla formada por la reunion de muchas moléculas de la sustancia constituyendo un poliedro cuyos ángulos corresponden á los centros de gravedad de las moléculas componentes.

La hipótesis de Delafosse explica cuantas particularidades referentes á la cristalografía quedaban sin aclarar en la concepcion de Hauy, entre otras la *hemiedria*: suponiendo en efecto (fig. 67) que las moléculas integrantes de una sustancia hemiedrica, como la *boracita*, están compuestos de cuatro

Fig. 67.



moléculas físicas formando un tetráedro regular, y agrupadas de modo que constituyan un cubo, siendo los ejes de las moléculas físicas paralelos y sus centros de gravedad uniformemente distribuidos, se ve que los dos extremos de una diagonal del cubo no están en las mismas condiciones, pues los tetráedros ele-

mentales presentan su vértice hácia fuera en uno y sus bases en el otro.

93—La configuracion interior ó *estructura* de los sólidos no deja de ofrecer tambien circunstancias interesantes: con frecuencia es el resultado de la agregacion más ó ménos ordenada ó confusa de cristales pequeños ó grandes, como se ve rompiendo el estaño, el bismuto, el mármol sacaróideo etc.; pero muchos cuerpos no presentan semejantes indicios de cristalización y más bien parecen formados por la aglomeracion de granos gruesos ó finos, siquiera algunas observaciones permitan aventurar el supuesto de que la estructura de tales partecillas es cristalina, ó, en definitiva, establecer que siempre que un sólido se produce, sus moléculas se agrupan con cierta regularidad.

La estructura cristalina puede ser *laminar*, como en la mica y en el mármol estatuario; *granujienta* como en el azúcar; *dendrítica* ó *arborescente*, como en ejemplares de bismuto, cobalto y cobre; *fibrosa*, *coralóidea* y *filamentosa* como en cier-

tas variedades de yeso, en el aragonito y en el amianto; y *pizarrosa* como en los esquistos.

La estructura no cristalina puede ser *compacta* como en la piedra litográfica; más ó ménos *granosa* como en las de construcción; *celular*, *porosa* y *tubular*, como en ciertas calizas, en la piedra pomez, etc.

Las petrificaciones tienen la misma estructura *orgánica* de las maderas, de las hojas, de ciertos animales, etc.

Muchas de estas estructuras se reconocen rompiendo los sólidos, y aun ofrecen variedades, como la *concheada*, la *astillosa*, etc., según el modo de presentarse las superficies de fractura.

Un mismo sólido es susceptible de poseer diferentes estados de agregación, ya discontinuos como las variedades *amorfa*, *grafitoide* y *cristalizada* del carbono, ya con caracteres de verdadera continuidad.

94-A—Los agentes físicos, ó sean las diferentes formas de la energía, modifican más ó ménos profundamente la forma y la estructura de los sólidos. Citaremos algunos hechos notables en comprobación.

B-a—Ciertas acciones mecánicas, como la compresión total, y los golpes del martillo, producen un aumento de densidad, al ménos en las capas superficiales, y la ruptura de los cristallitos que forman muchas sustancias cuyas masas resultan, después de *batidas*, más homogéneas. Este último efecto se nota bien en el estaño, que *grita* ó *cruje*, cuando se le dobla, por el rozamiento y la separación de los cristales, y no presenta tal fenómeno después de martillado ó *batido*.

Las vibraciones y trepidaciones influyen también en la agregación molecular, como lo prueba el hecho de hacerse quebradizos por tal medio los alambres flexibles de latón y de hierro, acaso á consecuencia de experimentar un principio de cristalización.

Rompiendo ó rayando el ioduro de mercurio amarillo se vuelve rojo y su cristalización pasa del tercer sistema al segundo.

Por división mecánica se transforma también el ácido arsenioso vítreo en opaco.

b—Los efectos del calor son más notables todavía. En-

friando bruscamente cuerpos muy calientes, ó sea *templándolos*, sufren cambios de densidad, elasticidad, etc., unas veces en un sentido, como en el acero, otras en el contrario, segun se observa con la aleacion de los *tantanes* (1 parte de estaño y 4 de cobre). Si el enfriamiento se verifica con lentitud, ó se *re-cuecen*, cada cuerpo ofrece modificaciones, aunque en sentido inverso, de las mismas propiedades que el temple hace variar.

Parece comprobado que el hierro fibroso pasa á cristalino sometiéndole á la accion de una temperatura muy baja durante mucho tiempo; razon á que se atribuye la ruptura de mayor número de ejes de wagon en ciertos ferrò-carriles durante el invierno. En Rusia se ha visto por la misma causa desmenuzarse algunos rieles de estaño hasta quedar reducidos casi á polvo.

Las sustancias dimorfas cristalizan en uno ú otro sistema segun la temperatura á que la cristalizacion se verifica; y los prismas oblicuos de azufre obtenidos á 111° se hacen poco á poco opacos y se disgregan en particillas octaédricas.

Calentando el ioduro rojo de mercurio se vuelve amarillo y su cristalizacion pasa del sistema segundo al tercero.

El ácido arsenioso opaco se trasforma en vítreo por la ebullicion en agua; y el vítreo en opaco bajo la influencia del agua y del frio.

c—La electricidad produce modificaciones de estructura, ó sea de la cohesion de los sólidos, no ménos notables. Lanzando una corriente eléctrica adecuada por un alambre de platino de $\frac{1}{20}$ de milímetro de diámetro y 40 centímetros de longitud, aparecen en toda su extension y á distancias semi-regulares una série de ángulos agudos. El hilo se hace á la vez quebradizo, tanto que si el experimento dura dos minutos se rompe espontáneamente.

En el momento en que una barra de acero se trasforma en iman bajo la influencia de una corriente eléctrica, experimenta una modificacion de estructura importantísima, acusada por ciertos fenómenos ópticos que más adelante estudiaremos.

d—Los rayos de luz realizan á veces cambios notables en la agregacion molecular de un cuerpo: el selenio, por ejemplo,

que puede existir en estado vítreo ó amorfo y en estado cristalino ó de aspecto metálico, expuesto á los rayos del sol pasa de una de estas formas á la otra.

§ II. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SÓLIDOS.

1.º—Deformaciones permanentes.

95-A—Al estudiar la elasticidad de los sólidos hemos hablado de la persistencia de una parte de las deformaciones despues que cesan las acciones tractoras, flexoras, etc.; y si entonces prescindimos de este fenómeno, porque experimentábamos dentro de límites en que no es perceptible, al presente vamos á ocuparnos del mismo con preferencia.

B—El resultado final de los hechos hasta ahora observados es que nunca obra una fuerza exterior sobre un sólido sin que deje de producir una deformacion, que en parte subsiste, y en parte desaparece cuando retiramos la fuerza: en un principio la deformacion permanente es pequeña y la temporal grande; pero más tarde sucede lo contrario, y podemos convenir en que se pasa el *límite de elasticidad* desde que la permanente es claramente manifiesta.

96-A—Al deformar un sólido por presion, miéntras esta no sea relativamente exagerada, se observa una reduccion de volumen algun tanto regular, en relacion con el valor de un *coeficiente de compresibilidad cúbica* (1) propio de cada cuerpo; pero á poco que los esfuerzos compresores aumenten de intensidad, la deformacion permanente empieza á crecer segun una ley compleja y no establecida, presentándose por último dos fenómenos sumamente curiosos, la *maleabilidad*, y la *vena sólida*, cuando se opera á altísimas presiones sobre cuerpos *blandos*, es decir que resisten á la ruptura por presion, pues en el

(1) El cálculo y la experimentacion parecen conformar, aunque son pocos los ensayos hechos sobre el particular, en que el coeficiente de compresibilidad cúbica es numéricamente igual al de compresibilidad lineal (67-D-b) en el supuesto de que $\frac{C}{E}$ sea igual á $\frac{1}{3}$ (68-A-b), y dentro del limite de elasticidad.

caso de otras sustancias el momento del fraccionamiento se presenta luego.

B—Sometiéndolo el plomo, el cobre y otros sólidos á la presión del laminador (fig. 68), (aparato que consiste en dos cilindros de acero que giran paralelamente, aunque en sentidos contrarios, y cuyos ejes pueden acercarse cuanto se quiera), se aplastan y extienden en sentido normal á la presión, llegando á transformarse en verdaderas hojas como las de papel. Semejante propiedad se llama *maleabilidad*, y apenas se observa más que entre los metales: el plomo, el estaño, el oro, el zinc, la plata, el cobre, el platino y el hierro, son maleables, de más á menos, en el orden que quedan nombrados.

C—Tresca, partiendo del hecho anterior, ha tenido la idea de someter los metales más usuales á presiones enormes en vasijas sumamente resistentes provistas de un orificio de salida; impedida con ello la extensión lateral que se verifica en el laminador, colocó á los sólidos en caso análogo al de un líquido encerrado en un vaso agujereado. En estas condiciones observó la formación de gotas, ó dardos de salida del metal, en el orificio, ó bien la aparición de un verdadero chorro ó *vena sólida*. La fig. 69 re-

Fig. 68.

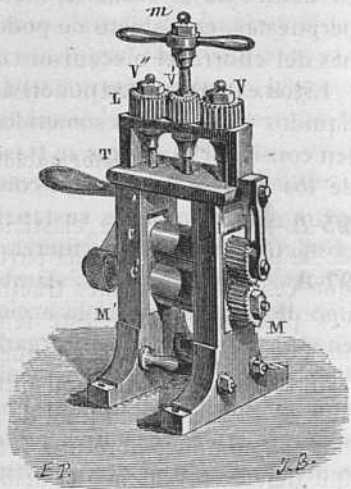
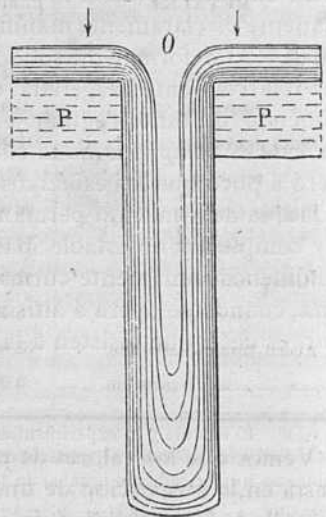


Fig. 69.



presenta la seccion de uno de estos cilindros de salida formado por capas concéntricas de plomo, en razon á que Tresca colocó dentro de la vasija el metal bajo la forma de láminas superpuestas, con objeto de poder apreciar mejor en las secciones del chorro el mecanismo del fenómeno.

Estos experimentos ponen de manifiesto analogías entre los líquidos y los sólidos sometidos á grandes presiones, y permiten consignar que estas se transmiten tanto mejor en el interior de los sólidos cuanto más considerables son; y que provocan un movimiento de las sustancias en las direcciones en que los obstáculos puestos á la fuerza mecánica son más débiles.

97-A—Sometiendo los alambres ó varillas suspendidos por uno de sus extremos á la accion de pesos tractores aplicados en el otro, se consigue alargarles de una manera permanente. La segunda columna del siguiente cuadro expresa los pesos p que obrando sobre un alambre de un milímetro cuadrado de seccion, determinan una prolongacion permanente de cinco centésimas de milímetro por metro; pesos que pueden considerarse como el límite práctico de elasticidad de las sustancias á que se refieren:

METALES.	p Límite de elasticidad.	P Peso que determina la ruptura.
Plomo estirado.	0,25 kilogramos.	2.07 kilogramos.
» recocado.	0,20 »	1 80 »
Plata estirada.	11.00 »	29.00 »
» recocida.	2.50 »	16.02 »
Platino estirado.	26 00 »	34.10 »
» recocado	14.50 »	23.50 »
Hierro estirado.	32.50 »	61.10 »
» recocado.	5.00 »	46.88 »
Acero fundido estirado.	55.60 »	83.80 »
» » recocado.	5.00 »	65.70 »

Vemos que los valores de p varían en una misma sustancia hasta en la proporcion de uno á once, poniendo en evidencia con ello la imposibilidad de caracterizar los sólidos por medio

de coeficientes numéricos representantes de sus propiedades mecánicas. Cuando las tracciones son superiores á p , los alargamientos crecen segun una ley compleja, ejerciendo además influencia sobre los mismos la duracion de la carga, el movimiento vibratorio de que puede estar animada la varilla, y otra porcion de circunstancias. Si despues que el alambre ha sufrido una prolongacion permanente, le sometemos á una carga débil, el efecto temporal de esta es casi igual que en el caso de no haber estado préviamente deformado el hilo metálico.

B—A las deformaciones permanentes por traccion debe referirse la *ductilidad* ó propiedad que tienen algunos metales de estirarse en alambres cuando se les hace pasar por una série de orificios de diámetro cada vez menor practicados en una chapa de acero llamada *hilera*. El platino, la plata, el hierro, el cobre, el oro, el zinc, el estaño y plomo, son ductiles en el orden, de más á ménos, en que quedan citados.

98—Retorciendo un alambre más allá de cierto límite en que la torsion temporal es proporcional á la fuerza de torsion, se presentan efectos permanentes y fenómenos muy curiosos cuya importancia veremos al estudiar la electricidad y el magnetismo.

En un principio se nota que, al suprimir la fuerza de torsion, el alambre se destuerce súbitamente hasta cierto grado y despues más lentamente hasta otro inferior correspondiente á la nueva posicion de equilibrio: el valor de la torsion permanente crece primero poco á poco y despues con gran rapidez.

Si en un alambre retorcido se produce una torsion inversa poco considerable, el efecto temporal de esta se sobrepone á la permanente del hilo, sin destruirla, de modo que cesando la torsion inversa el alambre queda con su primitiva permanente.

Cuando la torsion inversa es muy considerable puede llegarse á destorcer al alambre; mas para ello basta una fuerza menor que la que produjo la torsion del mismo.

Sometiendo el hilo á múltiples acciones de torsion, la torsion final permanente resulta de la superposicion de los efectos de cada una de ellas.

99—La flexion produce curvaturas ó deformaciones perma-

mentes, tanto más importantes cuanto mayor es la flecha. En la casi totalidad de los sólidos llega pronto el momento de la ruptura; pero algunos pueden encorvarse hasta el punto de que una parte de los mismos se sobrepone á la otra, como se observa en el plomo, el papel, etc., razon por la cual se les llama *flexibles*; estas sustancias se rompen tambien, sin embargo, doblándolas várias veces en sentidos contrarios con cierta rapidez.

2.º—Resistencia á la ruptura.

100—*Dureza* es la resistencia que oponen los sólidos á dejarse rayar por otros. Eligiendo diez cuerpos entre las especies minerales cristalizadas mejor definidas, Mohr ha formado una escala gradual cuyos extremos son el cuerpo más blando y el más duro de todos los conocidos, y en la que cada término de la série raya á su anterior y es rayado por el siguiente: dichas diez sustancias son:

1 Talco.	6 Feldespato.
2 Yeso.	7 Cuarzo.
3 Caliza.	8 Topacio.
4 Espato fluor.	9 Záfiro.
5 Fosforita.	10 Diamante.

La dureza de cualquier cuerpo es igual á la de alguno de la escala, ó está comprendida entre dos consecutivos.

El rayado representa la ruptura de la superficie del sólido, y su aplicacion más inmediata es el esmerilado y el pulimento; pero en la desigual dureza de los cuerpos se funda la confeccion de los instrumentos de cortar, aserrar, taladrar, etc.

101—La resistencia que oponen los sólidos á la ruptura por presion, ya continúa, ya intermitente como los golpes de martillo, es muy variable segun la dureza, flexibilidad etc. del cuerpo sometido al ensayo: á veces la masa se deshace fácilmente en pequeños pedazos y hasta casi en polvo, cuyo fenómeno se llama *fragilidad*, al paso que otras solo se nota un aplastamiento ó una dificultad grande para la disgregacion.

Los cuerpos duros, y especialmente si son cristalinos como las piedras preciosas, el vidrio, etc., figuran generalmente entre los frágiles.

102—*Tenacidad* es la resistencia que oponen los sólidos á la ruptura por traccion: se ensaya colgando pesos de los alambres ó varillas, como si se tratara de producir deformaciones permanentes; y en la tercera columna del cuadro incluido en el número **97-A** están consignados los pesos *P* que determinan la ruptura de algunos hilos metálicos.

En igualdad de otras circunstancias la carga mínima que produce el fraccionamiento es *proporcional á la seccion transversal de la varilla, é independiente de su longitud*; siquiera los alambres largos suelen romperse más fácilmente que los cortos en razon á la mayor probabilidad de que tengan defectos de homogeneidad; y resistan algo más los muy delgados por una razon análoga, pues las varillas gruesas presentan una diferencia apreciable de densidad entre la capa superficial y las interiores, y son, por ello, de estructura heterogénea.

La forma tiene tambien alguna influencia; así un prisma resiste ménos que un cilindro, en igualdad de seccion; y el cilindro hueco más que el macizo, correspondiendo el máximo de la resistencia al caso en que la razon entre el radio exterior y el interior es de 11 á 5.

El calor modifica notablemente la tenacidad; un alambre de hierro que á 10° se rompe con un peso de 60 kilos, lo verifica á 370° con 54 k, y á 500° con 35 k.

En muchos cuerpos, como las maderas, el hierro laminado, etc., la tenacidad, como la elasticidad, varía segun el sentido en que se la ensaya.

103—La ruptura de los alambres ó barras retorcidas se verifica, generalmente por el medio, desde que la torsion es considerable; si la sustancia es flexible se rompe lentamente y por partes; y cuando rígida, bruscamente y ofreciendo una superficie de ruptura algo cónica y erizada de estrías helizoidales.

Los sólidos fibrosos como las maderas, el hierro obtenido á la hilera etc. se hienden paralelamente á las fibras ántes de romperse.

104—Se llama *resistencia relativa* la que una barra opone á la ruptura por flexion: á este efecto las varillas ó vigas pueden estar apoyadas por su mitad y ser cargadas en los extremos; ó sostenidas por éstos, y sufrir el peso flexor en el centro; ó su-

0

la igualdad de seccion tambien

se sabe tambien que es tiempo atimo

jetas solo por un extremo y llevando pesos en el otro. Al último caso se refieren las leyes siguientes:

1.^a *La fuerza necesaria para romper una barra se halla en razon inversa de la longitud de la misma.*

2.^a *Cuando la seccion de la viga es un rectángulo sobre uno de cuyos lados, tomado como anchura, obra perpendicularmente la fuerza, ésta será proporcional á la anchura.*

3.^a *La fuerza de ruptura es proporcional al cuadrado del espesor de la barra.*

La fuerza necesaria para la ruptura es menor por flexion que por traccion.

Ciertos cuerpos que se rompen fácilmente al doblarlos se llaman *quebradizos* ó *astillosos*.

105—*Resistencia trasversa* es la que los cuerpos ofrecen cuando se les somete á una accion como la de las tigeras; es decir á una fuerza que obra en el mismo plano en que se va á verificar la ruptura, y cuyo efecto es hacer resbalar una porcion del cuerpo sobre otra.

Esta resistencia se halla poco estudiada: Vicat, á quien se se deben algunos trabajos sobre ella, afirma que es la mayor de todas las resistencias que ofrecen los sólidos despues de la resistencia al aplastamiento.

3.^o—Rozamiento interior de los sólidos.

* **106**—Una de las particularidades más interesantes que ofrece la torsion es el hecho de que un alambre retorcido no vuelve inmediatamente (98) á su posicion definitiva de equilibrio: este fenómeno elástico ha sido llamado por Weber *elasticidad residual*.

Cuando cesa la fuerza de torsion las varillas se destuercen y tuercen varias veces consecutivas, si bien presentando cierto decrecimiento en esta especie de oscilaciones, que la resistencia del aire no explica suficientemente.

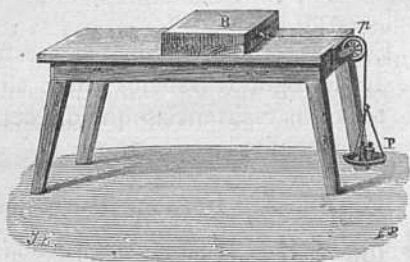
Mayer atribuye tales fenómenos á un *rozamiento interior* de los sólidos, ó resistencia para moverse las capas del mismo unas en contacto de otras. Durante la torsion, en efecto, las moléculas de los hilos ó varillas se van situando en hélices, de mayor diámetro las superficiales y de menor hácia el centro; y de aquí que el límite de elasticidad sea alcanzado por las primeras capas ántes que por las últimas, y que puedan existir rozamientos entre ellas tanto al torcerse como al destorcerse las varillas.

§ III.—ROZAMIENTO EXTERIOR DE LOS SÓLIDOS.

107—A—Dáse el nombre de *rozamiento* á la resistencia que experimentan los cuerpos para moverse unos en contacto con otros: al empezar el arrastre ó resbalamiento dicha resistencia es mayor que luego de establecido el movimiento. El mecanismo de este fenómeno es desconocido, por más que se refiera principalmente su causa á cierto engranaje entre las asperezas superficiales de los cuerpos en contacto.

B—Experimentando con el *tribómetro*, fig. 70, (aparato que consiste en una mesa pulimentada sobre la cual pueden ser arrastrados, por medio de un cordón de que pende un platillo con pesas P, prismas, como el B, de diferentes caras, sustancias y peso), Coulomb dedujo las siguientes conclusiones empíricas: *el rozamiento varía proporcionalmente á la presión de las superficies en contacto; es independiente del área de las mismas, y de la velocidad; disminuye si esta pasa de 4 metros por segundo, y mediante la interposicion de ciertos líquidos, grasas, ó sustancias pulverulentas; y aumenta con las asperezas, y cuando los dos cuerpos son de la misma sustancia.*

Fig. 70.



C—Se llama *coeficiente de rozamiento* el número por el que se debe multiplicar la presión normal para obtener en cada caso el valor de la fuerza equivalente al rozamiento: el del bronce sobre fundición es 0,22; el de esta sobre encina 0,49, etc.

D—Cuando el un cuerpo *rueda*, en vez de resbalar, sobre el otro, el rozamiento es mucho menor; y puede admitirse á modo de leyes, también empíricas, del fenómeno, ó sea dentro de los límites prácticos, que *la resistencia es directamente proporcional á la presión, y está en razón inversa del radio de la rueda ó cilindro.*

CAPÍTULO II.

ESTADO LÍQUIDO.

§ I.—PRINCIPIO DE PASCAL.

108—A—Ante todo es conveniente observar: 1.º Que la facilidad grande con que los líquidos cambian de forma (**13—B-c**), ó sea la movilidad de sus moléculas, supone al parecer que la constitucion material de tales fluidos debe ser homogénea en todos sus puntos, miéntras no los perturbe la atraccion del planeta ni ninguna otra accion exterior: y 2.º Que el hecho de encontrarse en la superficie terrestre sometidos á la gravedad, exige que los mismos sean manejados en vasijas, es decir en contacto con cuerpos sólidos: algunas veces, sin embargo, como veremos, se estudian unos líquidos en el seno de otros.

B—El mecanismo del estado líquido es á rigor tan desconocido como el del sólido: por más que las propiedades y fenómenos de que seguidamente daremos noticias, permiten aventurar algunas conjeturas ó hipótesis, especie de puntos de avance desde los cuales quiere entereverse algo, la ciencia no ha podido aun formular una teoría general de los líquidos.

Admitiremos, sin embargo, que las moléculas de dichos fluidos ejercen acciones recíprocas unas sobre otras, y que las fuerzas elásticas que se desarrollan entre las mismas cuando sus distancias varían, se dejan sentir por igual en todas direcciones y cualquiera que sea la porcion perturbada de la masa líquida.

109—A—Se debe á Pascal el conocimiento del siguiente enunciado: *los líquidos transmiten con igualdad en todos sentidos, y cada uno de sus puntos la sufre de igual modo, toda presion que se ejerce sobre una parte de su superficie ó del interior de su masa.*

La comprobacion experimental de tan importante teorema puede hacerse con el aparato fig. 71, que consiste en un vaso esférico provisto de una porcion de orificios, unido á un cilindro hueco ó cuerpo de bomba en cuyo interior hay un émbolo ó piston: llenos la esfera y el cilindro de agua, bastará empujar al émbolo para ver salir chorros líquidos que se alejan á igual distancia del aparato en todas direcciones, acusando la igualdad de la fuerza que los impulsa.

Más adelante hallaremos en la *pressa hidráulica* una demostracion práctica de este notable enunciado más precisa que el anterior experimento.

B—Vamos á fijar bien el significado y extension del principio de Pascal; y al efecto supongamos, fig. 72, una vasija *V* llena de agua, con una abertura *AB* á que se aplica un tubo con émbolo destinado á comprimir el líquido.

Al aproximarse las moléculas de agua bajo la accion de la fuerza se desarrollará entre ellas una repulsion elástica que dilatando en un principio la vasija, dará enseguida lugar á un estado de *tension* ó equilibrio entre la reaccion de las paredes del depósito y la fuerza repulsiva molecular. Sea *m n* un elemento de la masa líquida, y concibamos, pasando por él, una superficie *DC* que divida al agua en dos partes sin comunicacion alguna; lo cual en nada altera el equilibrio interior de la masa: las acciones elásticas ejercidas sobre *m n* por el líquido situado á la derecha, pueden ser consideradas como iguales y paralelas en todos sus puntos, á causa de la pequeñez del elemento; y darán una resultante normal al mismo por razon de simetría, á que llamaremos *pression* ejercida sobre *m n*: y como se admite la idéntica constitucion del líquido en todos sus puntos y en todas direcciones, dicha *pression* resulta inde-

Fig. 71.

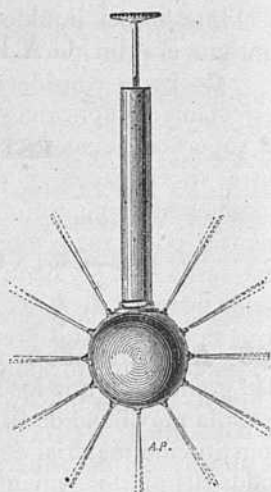
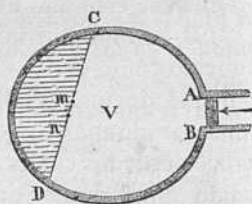


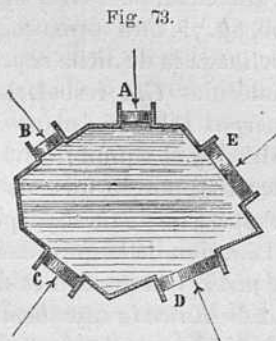
Fig. 72.



No sale
resaca por
la gravedad

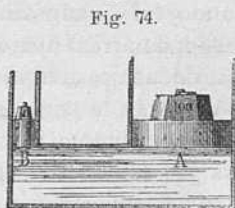
pendiente de la direccion de la superficie mn y de su posicion en el interior del líquido. Tal es la *igualdad de presion* que consigna el principio de Pascal.

C—Estas consideraciones son perfectamente aplicables en el caso de superficies cualesquiera iguales entre sí, en razon á que estarán compuestas de igual número de elementos: por manera que si tenemos una vasija, fig. 73, llena de agua y varios pistones $A, B, C...$ cerrando otros tantos orificios practicados en sus paredes, una presion P ejercida sobre A se comunicará íntegra al émbolo $B=A$; y para que el B no salga hácia afuera habrá de aplicársele un esfuerzo P . Esto es lo que significa la *igual trasmision de las presiones*.



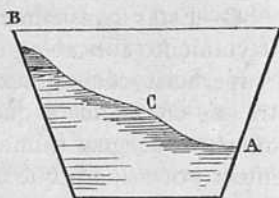
Se comprende sin dificultad alguna que si los émbolos C, D, E , tienen doble, triple, etc., superficie que el A , como cada unidad de superficie recibe una presion P , en definitiva sufrirán una accion igual á $2P, 3P...$; es decir, que *las superficies planas que pueden considerarse en el interior de una masa líquida, ó en las paredes de la vasija que la contenga, evidentemente experimentarán presiones proporcionales á sus áreas*. La demostracion experimental de esta forma de enunciado del principio de Pascal se practica fácilmente por medio del aparato fig. 74 que consiste en un depósito lleno de agua, con dos aberturas provistas de émbolos cuyas superficies están en la relacion de 1 á 100: colocando sobre B un kilogramo, es indispensable cargar 100 kilos sobre A para que este émbolo no suba.

110—La circunstancia de estar sometidos á la gravedad los líquidos que manejamos, determina, como consecuencias del principio de Pascal, una porcion de fenómenos importantes y curiosos en el caso del equilibrio de la masa, ó sea cuando cada una de sus moléculas sufre presiones iguales en todos sentidos: hé aquí los principales resultados á que nos referimos.



1.º *La superficie exterior de los líquidos es un plano horizontal* siempre que solo consideremos obrando sobre ellos á la gravedad; pues en el supuesto de ser, fig. 75, otra forma cualquiera é inclinada la de dicha superficie, las moléculas C... resbalarían, como cuerpos sobre un plano inclinado (Mec.), y el equilibrio no se restablecería, por lo mismo, mientras la superficie no fuese perpendicular á la acción de la gravedad. Esta superficie horizontal se llama de *nivel*, y la presión es uniforme en toda su extensión.

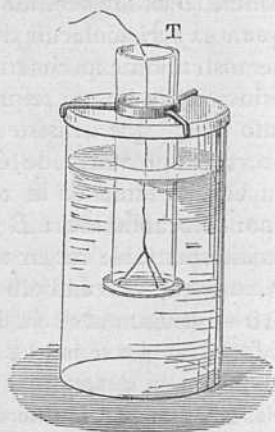
Fig. 75.



2.º *En cada capa horizontal dentro del líquido la presión es uniforme, y equivale al peso de una columna líquida cuya base sea la capa y su altura la distancia desde la misma á la de nivel: esta presión crece con la profundidad.*

Siendo horizontal la primera capa líquida, y admitida para el fluido una estructura homogénea anterior á toda acción sobre el mismo, es natural considerar la masa formada por capas horizontales de moléculas, que en virtud del hecho de la atracción terrestre descansarán y gravitarán unas sobre otras; y como cada capa recibe el peso de las que tiene encima, todas sus moléculas sufrirán igual presión de arriba para abajo y por lo tanto en todos sentidos; presión que aumentará con la profundidad de la capa. Aprovechando tal circunstancia de que la presión de arriba abajo debe ser igual á la de abajo arriba, se realiza en las cátedras la siguiente comprobación experimental: introdúcese, figura 76, dentro del agua un tubo T de cristal, abierto por el extremo superior y cerrado inferiormente con un disco ú obturador de madera ó de otro sólido á propósito que tenga una densidad aproximada á la del agua, y observaremos que el obturador se sostiene y no cae mientras no se echa agua den-

Fig. 76.



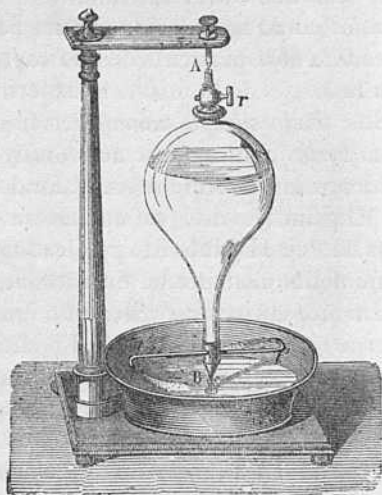
el mercurio se eleva constantemente en *bc* á igual altura bajo la presión del agua sobre el mismo metal fluido en la rama *a d*, por más que las cantidades del líquido productor de la acción sean muy diferentes según el tubo *V*, *V'*, *V''*, que se adapte á *d*.

4.º *La presión ejercida por un líquido sobre cualquier trozo de pared plana de la vasija que le contiene es igual al peso de una columna líquida que tenga por base dicho trozo de pared y por altura la distancia desde el centro de gravedad del mismo hasta la superficie de nivel.*

Como las presiones de arriba para abajo originadas por la gravedad en la masa líquida se transmiten en todos sentidos, es indudable que cada punto de las paredes laterales está sufriendo una presión normal (pues las presiones oblicuas á la pared se descompondrán en una paralela, sin efecto útil, y otra perpendicular á dicha superficie), y que la resultante de todas esas presiones representa la presión total sobre cualquier trozo de pared: solo que el crecimiento de las presiones con la profundidad (2.º resultado), hace preciso apelar al cálculo para establecer el enunciado anterior.

El *molinete hidráulico*, aparato representado por la fig. 78, pone de manifiesto la existencia de presiones iguales y contrarias sobre cada dos trozos opuestos de pared: consiste en un frasco *AB* de vidrio que puede girar fácilmente alrededor de su eje vertical, provisto en su parte inferior de un tubo de cobre *t t'* perpendicular á dicho eje y acodillado horizontalmente y en sentido contrario en sus dos extremidades: lleno el frasco de agua, las dos presiones iguales y opuestas de cada uno de los codillos *t* y *t'* se destruyen; pero dejando correr el líquido por los orificios, á cuyo objeto existe

Fig. 78.



la llave r , solo queda en cada codillo la presión contra la pared del ángulo, y se constituye un par de fuerzas que determina la rotación del aparato.

El punto de aplicación de la presión total sobre una pared se llama *centro de presión*, y se encuentra siempre algo más bajo que el centro de gravedad de la pared.

5.º *La resultante de todas las presiones de un líquido en equilibrio es igual al peso del fluido.*

Acerca de que vale cero la resultante de todas las presiones horizontales, en razón á ser cada dos iguales y opuestas, y sobre que en el caso de vasijas cilíndricas ó prismáticas rectas este 5.º enunciado se verifica, no cabe discusión ni duda alguna; únicamente cuando el vaso se ensancha desde la base es preciso observar que á la presión sobre el fondo (3.º resultado) debe añadirse la resultante de todas las presiones componentes normales á las paredes; y cuando, por el contrario, el recipiente del líquido se estrecha, dicha resultante, por ser de dirección contraria, destruye parte de la presión sobre el fondo, que en este caso es superior (3.º resultado) al peso del líquido.

Aplicando las reglas ordinarias de composición de fuerzas se puede demostrar fácilmente la generalidad y exactitud de esta 5.ª consecuencia, que aclara por completo la mal llamada *paradoja hidrostática*, ó sea el sentido en que aparece paradójica la 3.ª

6.º *Todo cuerpo sumergido en un líquido pierde de su peso una parte igual al peso del líquido desalojado; líquido cuyo volumen es evidentemente igual al del cuerpo.*

El principio de la composición de las presiones que acabamos de dejar establecido explica bien esta consecuencia importante del enunciado de Pascal llamada comunmente *principio de Arquímedes*: considerando, en efecto, la superficie del cuerpo sumergido compuesta por los elementos $s, s', s'' \dots$, las presiones que éstos sufran podrán reducirse á dos sistemas, uno horizontal y otro vertical; el primero cuya resultante es cero; y el segundo, que equivale á una presión única igual al peso de la masa líquida capaz de llenar el volumen del cuerpo sumergido, de efecto contrario á la gravedad ó que destruirá en cuanto valga al peso del cuerpo.

Según la forma y posición

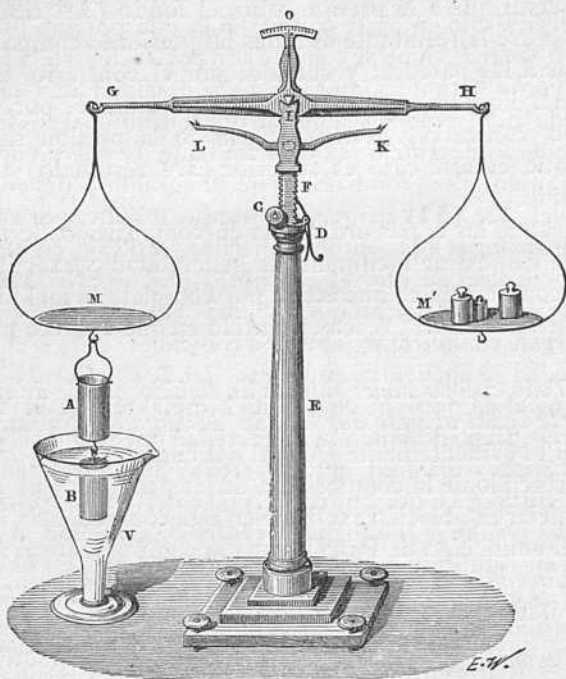
Suponiendo que el sólido sumergido sea un prisma recto (fig. 79), el razonamiento anterior es obvio al primer golpe de vista; pues las presiones sobre las caras laterales, PM y QN, son evidentemente iguales y opuestas y se destruyen; y la diferencia entre el valor de la fuerza de empuje sobre la base PQ y la presión contraria de arriba hacia abajo sobre la MN, equivale al peso de un prisma de líquido igual á PMNQ y actúa de abajo para arriba.

Fig. 79.



La comprobación experimental del principio de Arquímedes puede llevarse á cabo suspendiendo (fig. 80) de un gancho

Fig. 80.



añadido al platillo M de una balanza, dos cilindros, uno hueco A, y otro macizo B cuyo volúmen es exactamente igual al vacío del primero, y equilibrándolos por medio de pesas colocadas

en el otro platillo M'. Sumergido el cilindro B en el agua de una copa, el platillo M' desciende acusando la pérdida de peso sufrida por B; mas llenando el cilindro A con agua, el equilibrio de la balanza se restablece indicando que la pérdida de peso equivale al peso del agua desalojada.

Esta balanza cuyos platillos están provistos de ganchos se llama *balanza hidrostática*.

Al punto de aplicacion de la resultante de todas las presiones que sufre el cuerpo sumergido se le designa con el nombre de *centro de presion*.

Segun que la densidad de la sustancia sea mayor, igual ó menor que la del líquido, la primera descenderá en el seno del segundo, aunque con ménos velocidad que en el aire; ó se sostendrá en cualquier punto de la masa fluida; ó finalmente se sumergirá solo en parte conservando una porcion fuera del líquido ó *flotará*; como se concibe con poco esfuerzo la porcion de un cuerpo flotante sumergida debe desalojar una cantidad de líquido cuyo peso sea igual al del mismo cuerpo flotante.

Un cuerpo flotante no es otra cosa que un cuerpo apoyado en un líquido, y las condiciones de su equilibrio deben recordar las del caso (54) en que el sosten es sólido: por consideraciones análogas á las entónces hechas, se llega, en efecto, á la consecuencia de que el equilibrio será *estable* cuando el centro de gravedad del flotador esté más bajo que el de presion, *é indiferente* cuando ambos puntos coincidan; pero si el centro de gravedad se encuentra en la posicion de equilibrio á mayor altura que el de presion, como éste cambia de situacion al inclinarse el cuerpo flotante y el de gravedad no, cuando el punto, llamado *metacentro*, en que la vertical del nuevo centro de presion corta á la del centro de gravedad en la posicion de equilibrio, resulte más alto que el centro de gravedad, el cuerpo quedará en equilibrio estable, y cuando más bajo en *inestable*.

7.º *Las superficies libres de un líquido, ó de varios líquidos de la misma densidad, en vasos ó capacidades comunicantes están situadas en la misma capa horizontal; ó en otros términos: cualquier líquido se eleva á igual altura en depósitos comunicantes.*

Si los líquidos son dos y sus densidades diferentes, dichas alturas están en razon inversa de las densidades.

El aparato representado por la fig. 81, en el cual el vaso V se encuentra en comunicacion con los V' , V'' , V''' por medio del tubo ed , sirve para demostrar la primera parte del presente enunciado; y el tubo de

Fig. 81.

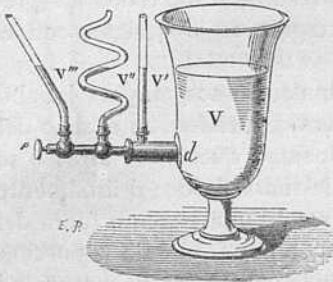
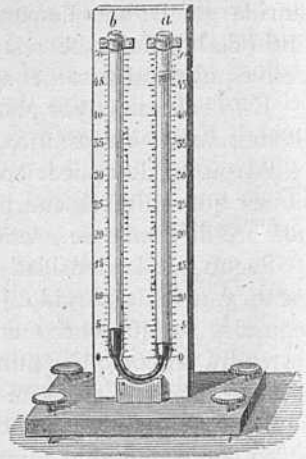


Fig. 82.

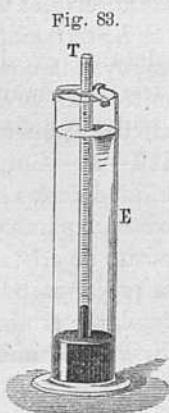


cristal en U, de la fig. 82, abierto por ambos extremos y cuyas dos ramas a y b están divididas en partes iguales, para comprobar la segunda.

El agua, en efecto, llega al mismo nivel en todas las capacidades comunicantes en el primero; y el mercurio de la rama b y el agua de la a , en el segundo, tienen alturas aproximadas como 1 y 13,5 (el mercurio viene á ser trece y media veces más denso que el agua) contadas desde la superficie del metal líquido en a .

La explicacion de este fenómeno nó ofrece dificultad alguna: desde luego se comprende que si se solidificara una seccion transversal líquida del conducto de comunicacion entre dos depósitos, ó si, continuando líquida, permaneciera inmóvil, el equilibrio del fluido estaría tan asegurado como si se tratara de dos vasos diferentes; pero observemos que siendo equivalente la presion sobre cada cara de dicha seccion al peso de una columna líquida cuya base sea la seccion, ambas columnas, correspondientes á las dos caras de la misma, tienen igual base; luego para que pesen igualmente, y la seccion fluida no se mueva, han de alcanzar idénticas alturas tratándose del mismo líquido, ó alturas en razon inversa de las densidades en el otro caso de líquidos que las posean diferentes.

El grabado 83 representa otra manera de comprobar el segundo extremo de este 7.^o resultado, sobre la cual llamamos la atención: un tubo T de vidrio, vacío de agua y abierto por ambos lados, se sumerge en el mercurio que ocupa el fondo del depósito de cristal E; sobre el metal líquido descansa cierta cantidad de agua, cuyo peso determina la elevacion en T de una columna del mismo; y el peso de ésta, contada desde el nivel exterior del metal, debe equivaler al de una columna de agua de igual diámetro y cuya altura sea la distancia desde la superficie del mercurio en E hasta el límite superior del agua. Más adelante tendremos ocasion de recordar este experimento.



8.^o *Colocando en un mismo vaso varios líquidos no susceptibles de mezclarse, se superponen por orden de densidades, los más pesados abajo, y las superficies de separacion son horizontales.*

La fig. 84 representa un tubo, llamado *botella de los cuatro elementos*, en el cual se sobreponen aceite de petróleo, alcohol teñido, una disolucion concentrada de carbonato de potasa y mercurio.

Fig. 84.

La explicacion de la primera parte del fenómeno está dada por el principio de Arquímedes, pues ninguna partícula líquida se sostendrá en el seno de otro líquido ménos denso; y por lo que se refiere á la segunda, basta observar que cada líquido se conduce con entera independencia de los demás y como si estuviera en una vasija sólida, para comprender que las superficies de separacion deben ser horizontales, y por tanto paralelas, segun la primera consecuencia del principio de Pascal.



§ II.—COMPRESIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS.

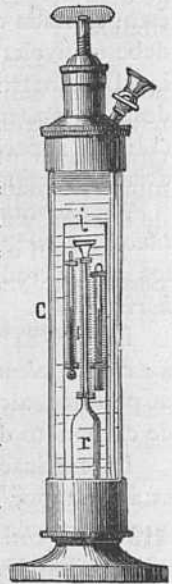
111—Es muy característica del estado líquido la poca compresibilidad de los cuerpos cuando afectan dicha forma de la

materia; hasta el punto de haber pasado tales fluidos por incompresibles durante mucho tiempo.

La experiencia ha demostrado que cualquiera que sea el valor de la compresion los líquidos recobran su volúmen primitivo tan pronto como cesa la accion mecánica, hecho por el cual se los considera como perfectamente elásticos.

112—A—Con objeto de establecer y comparar la compresibilidad de los líquidos inventó Ersted el *piezómetro*; aparato que consiste, fig. 85, en un depósito de cristal *r*, cerrado inferiormente, y que se prolonga por arriba segun un cuello ó tubo capilar *l* terminado en un embudito *j*; debe medirse el volúmen del depósito *r*, y el tubo *l* lleva asimismo una division en partes de capacidad conocida. Dentro de esta pequeña botella *rlj* se introduce el líquido cuya compresibilidad va á ser objeto de estudio, de modo que la llene completamente, sirviendo de tapon una gota de mercurio colocada en el embudito *j*.

Fig. 85.



La tablilla de metal donde va sujeto el frasco *rlj* sostiene además dos pequeños instrumentos, que representa la figura, destinados á medir la presion y la temperatura durante los experimentos; y el todo va metido dentro de un vaso cilíndrico *C* de cristal, de paredes muy resistentes, reforzado por abajo con un pié metálico y provisto superiormente de un embudo, y de un tapon que puede bajar y subir por medio del tornillo terminal que indica el grabado.

B—Se llama *coeficiente de compresibilidad* de un líquido la disminucion de volúmen que experimenta una columna prismática ó cilíndrica recta del mismo, cuyo volúmen sea igual á la unidad, bajo el peso de una columna de mercurio á $0,76^m$ de altura.

Para determinar un coeficiente de compresibilidad se introduce el líquido en la botella piezométrica *rlj*; se llena de agua el vaso *C*; y una vez colocada la primera dentro del segundo, se hace girar el tornillo superior del aparato de modo que el tapon descienda y comprima al agua de *C*, y por lo

tanto al frasco *rlj* directamente, y al líquido en estudio por intermedio de la gota de mercurio que va en *j* y que correrá á lo largo del cuello *l* á causa de la reduccion de volúmen del líquido medido en *rlj*. Hecho lo cual, tan pronto como el termómetro interior marque la misma temperatura del aire exterior, se anota la contraccion acusada por el descenso del índice de mercurio, y se la divide por el volúmen primitivo del líquido y por la presion, medida en pesos de columnas de mercurio de 0,76 m, y el último cociente será el coeficiente de compresibilidad.

C—Los coeficientes determinados por este procedimiento no son exactos en razon, principalmente, á que la botella *rlj* disminuye de volúmen durante cada experimento; por cuya razon otros físicos, Colladon y Sturm, Regnault, Jamin, etc., han dirigido sus esfuerzos á perfeccionar el método de Ersted y á corregir las cifras por el mismo establecidas.

Hé aquí algunos coeficientes de compresibilidad determinados por Jamin :

Agua destilada	á 15°	45 millonésimas del volúmen primitivo.		
Alcohol	á 0°	83	>	>
Alcohol	á 15°	91	>	>
Éter	á 14°	128	>	>
Mercurio	á 15°	1	>	>
Sulfuro de carbono	á 14°	63	>	>

113—Las consecuencias más salientes á que conduce el estudio de la compresibilidad de los líquidos son estas: Colladon y Sturm, operando sobre el agua y sobre el mercurio, y Grassi, estudiando con gran esmero la compresibilidad del agua, han observado que dentro de ciertos límites el decrecimiento de volúmen es proporcional á la presion: á grandes presiones, segun los trabajos de Cailletet, varía poco la compresibilidad de los líquidos; y, finalmente, Despretz ha llamado la atencion por vez primera acerca de la influencia grande que tienen la temperatura y la presion combinadas sobre el valor del coeficiente, para deducir que en general la compresibilidad no debe ser proporcional á la presion, sino, probablemente, una funcion compleja de ésta y de la temperatura en relacion con las circunstancias de cada líquido.

§ III.—COHESION DE LOS LÍQUIDOS.

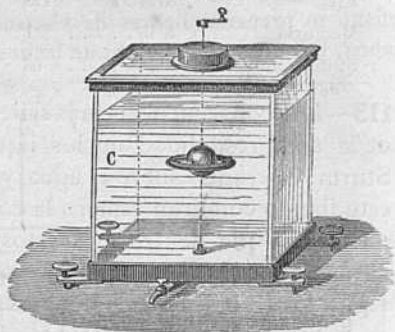
114—El hecho de estar sometidos los líquidos á la accion de la gravedad, y la necesidad de manejarlos en contacto con cuerpos sólidos, son dos graves obstáculos para estudiar experimentalmente la cohesion de las moléculas de tales fluidos: vamos, sin embargo, á pasar revista á algunos fenómenos curiosísimos que no dejan duda alguna acerca de la existencia de dicha fuerza.

115—A-a—Con objeto de suprimir las influencias perturbadoras de la atraccion terrestre y de la adhesion, y de poder observar los líquidos en libertad, Plateau hizo una mezcla de agua y alcohol en proporciones tales que su peso específico resultó igual al del aceite de olivas, é introduciendo por medio de una jeringuilla de cristal cierta cantidad de este último líquido en el seno de la mezcla, lo vió aglomerarse y formar una esfera; figura de equilibrio que patentiza perfectamente la cohesion.

* **b**—El mismo experimentador colocó la mezcla de agua y alcohol en una caja de cristal (fig. 86) C, atravesada verticalmente por un alambre provisto de una manivela exterior, para hacerle girar, y de un pequeño disco horizontal de hierro hácia su parte media; y alrededor de este disco, préviamente engrasado, situó con la jeringuilla cierta cantidad de aceite, que, como en el experimento anterior adoptó la forma esférica: puesta en rotacion esta masa, se aplastó primero por efecto de la lucha entre la fuerza centrífuga y la cohesion; y más tarde, cuando la velocidad fué suficiente, se separó del disco de hierro constituyendo una anillo perfecto y regular alrededor del mismo.

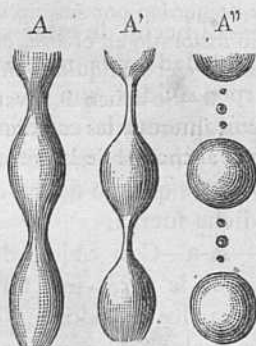
c—Se colocan horizontalmente uno sobre otro, pero á distinta altura, dos anillos de hierro engrasados, el inferior descansando por medio de tres piés sobre el fondo de la cuba C, y el superior sujeto

Fig. 86.



á una varilla que atraviesa la tapa de dicha caja; é introduciendo entre ellos aceite, veremos á este líquido tomar la forma de un cilindro susceptible de alargarse (hasta que su altura venga á ser grande con relación á su diámetro) sin más que elevar lentamente el anillo superior.

Fig. 87.



Solo que llega un instante en que la cohesion del líquido no permite mayor alargamiento, ó el equilibrio molecular se hace inestable; y el cilindro se convierte en una columna con vientres y estrangulaciones, y despues se divide de modo que cada vientre produce una esfera gruesa y cada estrangulacion una pequeña, resolviéndose en definitiva el todo en una série de grandes gotas separadas entre sí por varias gotitas. La figura 87 representa tres momentos sucesivos de estos bellísimos efectos de la cohesion de los líquidos.

B—Tomando por precedente la formacion de burbujas de agua de jabon que constituye parte de los entretenimientos infantiles, puede llegarse á producir otras figuras de cohesion de los líquidos, como lo son las burbujas, pero mucho más caprichosas que éstas. Al efecto se preparan licores de viscosidad superior á la del agua de jabon, utilizando cualquiera de las recetas que con tal fin se han in-

Fig. 88.

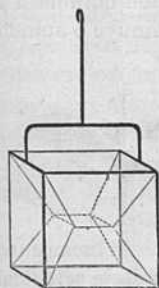


Fig. 89.

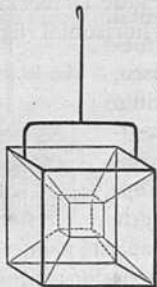
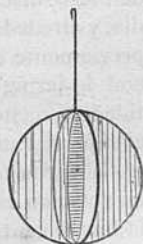


Fig. 90.

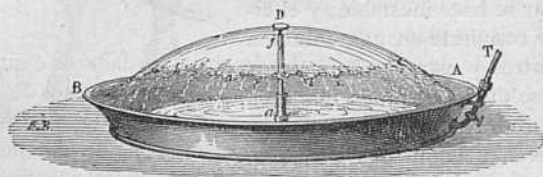


ventado; é introduciendo en ellos una especie de esqueletos (figs. 88, 89, 90) ó armaduras ya rígidas (de alambre) ya de aristas flexibles (de alambre é hilos), se observa que al retirarlos llevan consigo cierto número más ó ménos considerable de láminas líquidas planas ó curvas, dispuestas regularmente, unas veces inestables, otras persistentes.

C—El profesor Esriche, de Guadalajara, ha llamado la atención sobre otro fenómeno en que se presenta con claridad haciendo papel la cohesión de los líquidos; á saber, la formación de anillos, que recuerdan por sus circunstancias y movimientos á los del hidrógeno fosforado en el aire, cuando se vierten por medio de una pipeta gotas de ciertos líquidos en la masa de otros.

D—Se deben á Savart, y posteriormente á otros distinguidos físicos, interesantes estudios sobre los vistosos fenómenos que acompañan al choque de las venas ó chorros líquidos: la figura 91 repre-

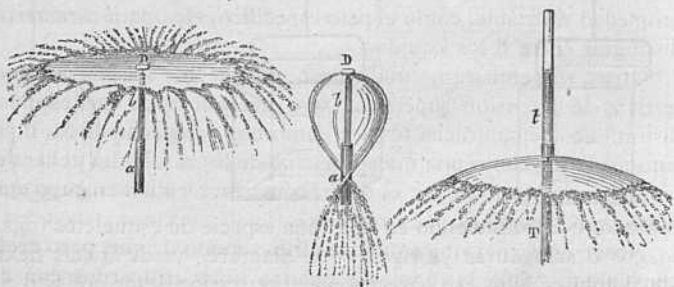
Fig. 91.



senta el efecto producido cuando el surtidor correspondiente al caño *aj* tropieza á su salida con el disco *D*: la vena se rompe contra el disco extendiéndose en una hoja circular cuya parte central es delgada y trasparente, al paso que los bordes presentan estrías radiales que se resuelven en una lluvia de gotas.

En un mismo líquido la figura y la dimension de esta bella aureola varían con la presión, con la distancia del disco al orificio y con su diámetro. El fluido lanzado contra el disco se encuentra, en efecto, sometido á la fuerza de proyección nacida en el choque, á la gravedad, á la cohesión del líquido, y su adhesión con la sustancia del disco; si la presión es grande la fuerza de proyección domina á las otras y la aureola es casi horizontal (fig. 92); si disminuye ó aumenta

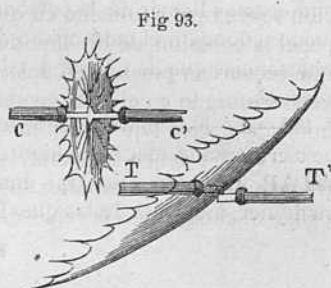
Fig. 92.



el diámetro del disco (y con ello la componente debida á la adhesión) las otras fuerzas, y principalmente las moleculares, dejan sentir su

efecto y la aureola se presenta convexa. El disco D puede ser sustituido sin inconveniente por una columna líquida contra la cual choque la vena (Tt, fig. 92), y así se suprime la intervención de la adhesión.

La fig. 93 representa el choque de dos venas; las CC', iguales en diámetro y velocidad, son directamente opuestas; las TT' reúnen la primera condición pero la T es más alta que la T' aun cuando ambas se conservan en el mismo plano vertical.



* 116—En vista de todos estos fenómenos, verdaderos é interesantes espectáculos de la atracción molecular, no puede ménos de ser admitida y de darse por suficientemente comprobada la cohesión de los líquidos así como la adhesión de los mismos con los cuerpos sólidos; pero no olvidemos la significación (5) que para nosotros tiene la palabra fuerza y el consiguiente sentido en que aceptaremos la de cohesión.

§ IV.— TENSION SUPERFICIAL.

* 117—Es opinion corriente entre muchos físicos la de comparar la superficie de los líquidos á una membrana elástica sometida en todos sus puntos á una tensión A, llamada *constante capilar*, igual para cada unidad de longitud. El valor de A es diferente segun el líquido; y aunque disminuye cuando la temperatura aumenta, y varía con el cuerpo en contacto con la superficie fluida, preténdese por los referidos experimentadores hacer de la tensión superficial un medio ó propiedad utilizable, como el peso específico, etc., para caracterizar y distinguir entre sí los líquidos.

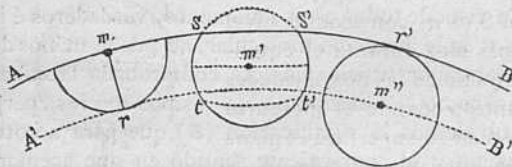
Otros, sin embargo, fundándose en que los fenómenos demostrativos de la tensión superficial son susceptibles de una explicación distinta no aceptan dicha tensión como una propiedad de los líquidos sino más bien como una interpretación de los resultados generales de la teoría capilar de Gauss, es decir, como un término en cuyo empleo puede haber comodidad, y nada más.

Nosotros participamos de este último modo de ver; pero creemos conveniente, dada la índole de nuestro libro, ocuparnos con cierta especialidad de los fenómenos de tensión superficial; y hasta en ello hay lógica, toda vez que entre estos hechos y los de cohesión, por

ejemplo, acaso no exista más diferencia, bajo el punto de vista que pudiéramos llamar de la personalidad de los mismos, que ser más ó ménos conocido el mecanismo de su produccion, ó la reunion de circunstancias que dan lugar á tales apariencias de propiedades de los cuerpos.

* 118—A—A Laplace se debe una primera concepcion clara respecto de cierto estado mecánico hipotético de las superficies de los líquidos: sea AB, en efecto, (fig. 94) una de éstas, de forma arbitraria, y m cualquier molécula de las que la constituyen: suponiendo á m resi-

Fig. 94.

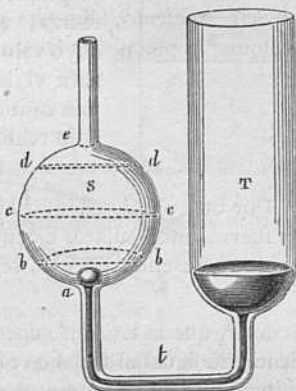


dencia de la cohesion, ó en general de fuerzas atractivas moleculares, y representando por mr el radio de accion sensible de las mismas, dicha molécula será solicitada por toda la masa semi-esférica que indica el grabado, y se producirá, en definitiva, una resultante normal á AB y dirigida hácia el interior del líquido. Considerando otra molécula m'' situada á una profundidad igual al radio $m'' r'$ de atraccion, ó superior al mismo, observemos que estará solicitada en todos sentidos por fuerzas iguales cuyo asiento se halla en la esfera de radio $m'' r'$ y que se destruirán unas con otras. Finalmente, si nos fijamos en una molécula, m' , de posicion intermedia entre las m y m'' , la porcion de masa que ejercerá accion sobre ella será el trozo de esfera $SS' t't'$, el cual puede dividirse en las tres partes, $Sm'S'$ y $tm't'$ y el casquete inferior cuya base es $t't'$: y como los efectos de las dos primeras se destruirán entre sí por iguales y opuestos, m' quedará sometida tan solo á la resultante del casquete inferior, que será normal á AB, y obrará hácia el interior del líquido, pero valdrá ménos que la fuerza análoga del punto m .

De todo lo cual se deduce, 1.º: Que en la capa superficial AB, A'B', cuyo espesor es igual al radio de accion sensible de las moléculas, se origina una *presion* llamada por Laplace *molecular*: y 2.º Que dicha presion es decreciente desde AB hasta A'B' y nula más abajo de A'B'. Debiendo además notarse que segun el principio de Pascal la presion molecular tiene que comunicarse uniformemente al resto de la masa líquida.

B—La forma de la superficie terminal AB influye en el valor de la presión molecular: llamando á esta A en el caso de la superficie plana, consideraciones idénticas á las hechas á propósito de la molécula m' (fig. 94) llevan inmediatamente á conclusiones de que cuando AB es convexa la presión molecular es mayor que A, y cuando cóncava menor; todo lo cual parece en perfecta coincidencia con el experimento á que se refiere la fig. 95: un vaso esférico S y otro cilíndrico T comunican por el tubo t ; y echando poco á poco mercurio en T se observa que cuando la superficie del mismo en S es a , convexa, el nivel en T es más alto durante el equilibrio del líquido en las dos cavidades comunicantes; cuando el mercurio llega en S á dd su superficie es plana y su nivel igual al del tubo T; y hácia e la superficie metálica se presenta cóncava y su nivel es más alto en S que en T.

Fig. 95.



C— Puede reprocharse á esta concepción de Laplace que no hay medio de demostrar prácticamente la existencia de la presión molecular cuando la superficie del líquido es plana; pues aun el experimento anterior, que tan convincente parece, en hecho de verdad solo pone de manifiesto diferencias de presiones moleculares. Objeción de que está libre la noción sintética de la *tensión superficial* debida al gran geómetra Gauss; quien observando, por ejemplo, que si se aplasta una gota de mercurio con una varilla de cristal, reaparece la forma esférica cuando cesa la acción mecánica deformadora, partió de que las fuerzas interiores del líquido puestas en juego por la fuerza exterior realizan un trabajo, durante la recuperación de forma, igual y contrario al producido por dicha fuerza exterior mientras se verifica el sencillo fenómeno experimental tomado como base de ulteriores razonamientos.

Y suponiendo que el efecto de la deformación hubiera sido producir una contracción en la superficie S del líquido, y atribuyéndolo no á fuerzas exteriores, sino á las fuerzas moleculares, el célebre alemán reconoció que el trabajo realizado por éstas, debe ser, sin error sensible, proporcional á la cantidad s en que haya disminuido S; y que por lo tanto dicho trabajo se hallará en cada caso representado por el producto As de una constante, A , característica del líquido por el valor de s .

La significacion particular que da Gauss á la constante A se funda en las consideraciones siguientes. Supongamos (fig. 96) una membrana rectangular tensa ABCD, cuya superficie sea S, fija invariablemente en AB, pero que puede moverse á lo largo de las dos varillas AP y BQ cuya distancia mútua es constante; y apliquemos al lado libre CD un peso, ú otra fuerza, que produzca cierta tension uniforme cuyo valor sea T por unidad de longitud y $T \times CD$ para el lado entero: si la membrana se contrae una cantidad s, el lado CD vendrá á EF y el trabajo realizado será

$$T \times CD \cdot CE = Ts$$

Por otra parte, cuando la membrana S sufre una contraccion s, las fuerzas moleculares ejecutan un trabajo proporcional á s y que se puede representar por As, segun queda dicho; luego

$$T = A;$$

es decir, que la tension superficial por unidad de longitud es numéricamente igual al trabajo realizado al contraerse la membrana referido á la unidad de área.

Cuyas consideraciones, comparando la membrana S con una superficie líquida, establecen la nocion de la *tension superficial* tal y como al principio (117) la dejamos definida.

* 119—Semejante estado de tirantez da origen á fenómenos sumamente curiosos, de los cuales, por vía de ejemplo, citaremos algunos notables.

1.º A corta distancia de la superficie del agua situemos una gota de éter: los vapores de éste se disolverán en la parte de agua más próxima, y como la tension superficial de la mezcla es menor que la del agua, el equilibrio se destruye en la superficie fluida y aparecerá un pequeño hueco ó fosa debajo del éter: el efecto de traccion en todos sentidos sobre dicha porcion de la superficie del líquido donde la constante capilar A disminuye de valor es tan grande, que si el agua ofrece un pequeño espesor puede llegarse á poner al descubierto el fondo de la vasija debajo de la gota de éter.

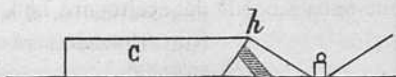
2.º Colocando una gota de aceite sobre una masa de agua, como el valor de la constante capilar A de la superficie agua-aire es mayor que la suma de los valores de A en las superficies agua-aceite y aceite-aire, la gota de aceite se encuentra sometida á una accion que tiende á estirarla en todos sentidos y que no puede resistir, y va extendiéndose poco á poco sobre la superficie del agua: lo mismo sucede reemplazando en este experimento el aceite por cualquiera otra grasa; y

de aquí que sea tan difícil obtener una superficie de agua pura ó sea con la tensión superficial propia de este líquido.

3.º Para quitar las manchas de grasa utilizáse á veces la disminucion de la tensión superficial producida por la elevacion de temperatura: al efecto se coloca papel absorbente en uno de los bordes de la mancha, y acercando al opuesto un hierro caliente, el líquido graso es atraído hácia la parte más fria donde lo recoge el papel poroso.

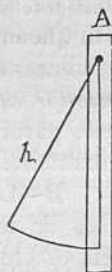
4.º La caja rectangular y poco profunda C (fig. 97) tiene una de sus paredes, *h*, muy delgada y giratoria; sosteniendo esta pared con un trozo de madera y un hilo en la posición oblicua que indica el grabado, y llenando la caja de agua, se puede quitar el taco sin que caiga *h*, y quemando el hilo, dicha pared movable es atraída hácia adentro.

Fig. 97.



5.º Fijemos á charnela un alambre ligero *h* (figura 98) en una tableta de metal A, y cuando descansen uno sobre otra impregnémosles de cualquier líquido viscoso: colocando la plancha horizontalmente y de modo que *h* quede hácia abajo, no solo no cae sino que si lo separamos de A vuelve á adherirse á la misma por la tensión de la lámina líquida que se forma entre el alambre y la tableta.

Fig. 98.



* 120—Partiendo de esta nocion de la tensión superficial es fácil determinar por medio del cálculo la forma de equilibrio de una superficie líquida. La ecuacion de dicha superficie, llamada *capilar*, á la que llegó tambien Laplace mediante su concepcion de la presión molecular, es la siguiente:

$$A \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) = P - d \zeta \quad (1)$$

En la cual A representa la constante capilar del líquido, R y R' los radios principales de curvatura de un punto de la superficie, y $P - d \zeta$ la presión normal por unidad de superficie (P es la presión sobre el fondo ó sobre otra capa de referencia para las presiones, d la densidad del líquido, y ζ un desnivel).

Hecha abstraccion de la gravedad, esta ecuacion se reduce á

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} = \frac{P}{A} = C \text{ (constante) } \quad (2)$$

á la cual satisfacen las superficies de las figuras de cohesion citadas en el núm. 115—A—B

* **121**—La tension superficial suele medirse en miligramos por milímetro de longitud; y la operacion puede efectuarse bien directamente apreciando el peso necesario para romper láminas líquidas muy delgadas, ya por otros procedimientos indirectos, á saber; comparando el peso de las gotas de un mismo líquido que salen por diversos orificios: ó el peso de las de diferentes líquidos formadas al extremo de un mismo tubo; ó utilizando la observacion de las ascensiones y depresiones capilares.

La tension de la superficie mercurio-aire es 55,63; la del mercurio-agua 42,58; la del agua-aire 7,55; la del alcohol-aire 2,59; la del aceite-agua 2,09; la del aceite-aire 3,76.

§ V.—DIFUSION.

122—A—Las propiedades de los líquidos anteriormente estudiadas nada indican acerca del estado de movilidad en que las moléculas de los mismos pueden hallarse; ántes bien, dado el modo de ser de los fenómenos expuestos, no repugnaría admitir que en un líquido en equilibrio dichas particillas ocupan posiciones fijas como sucede en los sólidos; el hecho de la *diffusion ó mezcla espontánea*, de que vamos á dar una sucinta idea, parece acusar, sin embargo, un estado de movimiento sumamente notable, en las moléculas líquidas.

B—La difusion solo se presenta entre líquidos susceptibles de mezclarse, pues sin esta circunstancia ya sabemos (**110**, 8.º) lo que se verifica colocándolos en un mismo vaso: el siguiente experimento da clara muestra de los fenómenos á que al presente nos referimos. Sobre una disolucion azul de sulfato de cobre que llena parte de una probeta de pié, coloquemos una laminita de corcho, y hagamos caer gota á gota, y con precaucion, agua sobre este cuerpo flotante; el resultado será la obtencion de una capa de agua superpuesta á la de la disolucion salina; solo que inmediatamente observaremos la formacion de una zona intermedia, mezcla de los dos líquidos, cuyo espesor va aumentando hasta trasformar el todo en un líquido uniforme, pudiéndose seguir por los cambios de color la marcha del fenómeno. Revolviendo ó agitando ambos líquidos no se hace sino acelerar la mezcla por el aumento de las superficies de contacto.

* **C**—Los experimentos de difusibilidad se realizan ordinariamente con disoluciones salinas, y á ellos se refiere la ley elemental del fenómeno enunciada por Fick del modo siguiente: *la cantidad de sal que pasa en cada instante á través de la unidad de superficie de una capa horizontal es proporcional á la diferencia de concentracion del liquido á una y otra parte de dicho plano.*

Ley cuya evidencia casi se concibe á priori, y que puede ser representada por una ecuacion idéntica á la de la ley de la propagacion del calor por conductibilidad.

D—Se llama *coeficiente de difusion* de una disolucion, á la cantidad de sal que pasa durante la unidad de tiempo á través de la unidad de superficie de una capa líquida cuyo espesor vertical valga 1, siendo tambien 1 la diferencia invariable entre la concentracion de los líquidos que bañan las dos caras de dicha capa.

No existe ningun procedimiento general para determinar los coeficientes de difusion: los siguientes, y otros varios, han sido hallados por diversos experimentadores apelando á procedimientos especiales é indirectos con frecuencia.

SUSTANCIA.	TEMPERATURA.	COEFICIENTE.	EXPERIMENTADOR.
Azúcar de caña.	14° á 15°	0,3144	Voit.
Azúcar de uva.	Id.	0,3480	Id.
Sal marina.	15°	0,9370	Fick.
Sulfato de zinc.	24°	0,2401	Weber.
Goma arábica.	10°	0,1300	Stefan.

Para calcular estos números se ha tomado como unidad de tiempo el dia, como unidad de superficie el centímetro cuadrado, como unidad de espesor el centímetro, y se ha supuesto que los pesos de sal disuelta en un centímetro cúbico de líquido á uno y otro lado de la capa difieren en 1 gramo.

E—El coeficiente de difusion de un líquido crece rápidamente con la temperatura y no parece ser completamente independiente de la concentracion como supone la ley de Fick. Existen, además, líquidos que se difunden uno en otro en todas proporciones; al paso que el resultado de la difusion del éter y el agua, por ejemplo, es la formacion de dos líquidos diferentes, superpuestos; y Duclaux ha observado que ciertas mezclas líquidas se separan en capas á determinadas temperaturas.

123—A—Interponiendo Graham láminas sólidas porosas de

sustancias inorgánicas, como el yeso, la plumbagina, etc., entre los dos líquidos difusibles, observó que el fenómeno se verifica casi lo mismo que cuando los fluidos están en contacto directo.

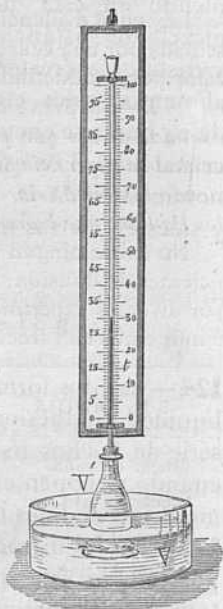
B-a—Pero si el diafragma poroso es orgánico, como un pedazo de vejiga ó de caucho, la difusión se presenta con caracteres especiales explicables tan solo admitiendo una especie de disolución ó combinación pasajera del sólido y los líquidos que le atraviesan.

El aparato representado por la fig. 99, el *endosmómetro* de Dutrochet, permite evidenciar las circunstancias de este caso de la difusión: consiste en un frasquito V' , cuyo fondo es un trozo de vejiga muy bien atado; á su cuello se ajusta un tubo t de poco diámetro, y el todo se sumerge en el agua clara del vaso exterior V , después de haber llenado á V' y á parte de t con una disolución de sal común ó de azúcar. Abandonado el aparato durante algunas horas, obsérvese que el nivel se eleva en el tubo, lo cual prueba el establecimiento de una corriente de agua desde fuera á dentro, á que se llama *endós-mose*; y que simultáneamente funciona otra corriente menor, denominada *exós-mose*, desde la disolución hácia afuera, porque la sal ó el azúcar aparecen en V .

b—Cuando el agua del vaso V se renueva sin cesar, el fenómeno no termina hasta la salida de toda la sal contenida en $V't$; pero llegado este momento Jolly ha creído notar la existencia de una razón constante entre el peso de la sal salida y el del agua entrada á través de la membrana, relación á que ha llamado *equivalente osmométrico* de la sal respecto de la membrana.

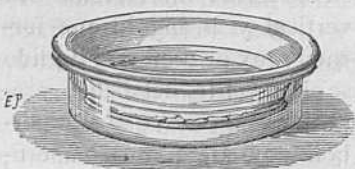
c—Los líquidos, agua, disoluciones salinas, etc., susceptibles de disolverse en el diafragma orgánico, se prestan á difundirse de este modo particular y han sido llamados por Graham *crystaloides*; pero no así la gelatina y la mayor parte de los líquidos orgánicos, los cuales rehusan atravesar la mem-

Fig. 99.



brana y han sido designados con el nombre de *coloides*. Colocando (fig. 100) en una vasija llena de agua, otra interior flotante cuyo fondo sea un trozo de piel de vejiga y poniendo en esta última una mezcla de sustancias coloides y cristaloides (restos animales, alimentos, sales, etc.), al cabo de 24 horas se encuentran en el agua del vaso exterior todos los cristaloides. Los químicos utilizan tal medio de separación, denominado *diálisis*, para investigar la presencia de los venenos y sales en ciertas materias orgánicas.

Fig. 100.



§ VI.—FENÓMENOS CAPILARES.

124—Las dos formas de atracción molecular, cohesión de los líquidos y adhesión de éstos con los sólidos determinan una serie de hechos físicos interesantes, llamados de *capilaridad*, cuando se ponen en contacto un sólido y un líquido: la enumeración de tales fenómenos es preferible á definirlos.

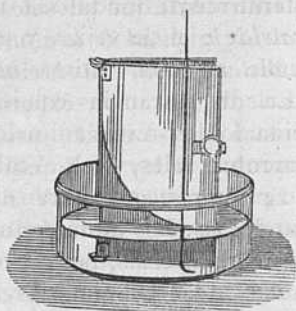
125—**A**—Al introducir una lámina de vidrio en el agua, cierta porción de ésta queda adherida al cristal *mojándolo*; mientras que del mercurio la lámina saldría perfectamente limpia ó *sin mojar*: semejante circunstancia de que los líquidos puedan ó nó mojar á los sólidos, aunque fenómeno capilar, tiene el carácter de hecho previo respecto de los siguientes.

1.º La superficie del agua deja de ser horizontal en las inmediaciones de un pedazo de vidrio, y se eleva alrededor de éste tomando una forma cóncava. Pero si el líquido no moja al cuerpo sumergido, como sucede al mercurio con el cristal, la superficie fluida desciende afectando una forma convexa.

2.º Entre dos láminas de vidrio paralelas y próximas se eleva un prisma de agua cuya superficie terminal es una media caña cóncava: el mercurio en iguales condiciones se deprime y su superficie entre las láminas aparece convexa. La experiencia demuestra además que *estas elevaciones y depresiones están en razón inversa de la distancia entre las láminas*.

3.º Introduciendo en agua dos vidrios planos reunidos por visagras (fig. 101) de modo que su arista de interseccion sea vertical y el ángulo que formen muy pequeño, el líquido se eleva dentro del diedro, presentándose como una hipérbola equilátera, y su superficie es cóncava. Operando con mercurio se observa un descenso de nivel entre las láminas, tambien de figura de hipérbola, pero con la superficie convexa.

Fig. 101.



Estos dos 3.ºs hechos no son á rigor otra cosa que una ingeniosa demostracion de los 2.ºs imaginada por Taylor.

4.º Sumergiendo en agua un tubo de pequeña canal GDPQ (fig. 102), aparece en su interior una columnita líquida cuya superficie terminal es cóncava, de elevacion tanto mayor cuanto el conducto del tubo es más estrecho (capilar), segun se ve en AB (fig. 103), y que llega á ser casi insensible cuando dicho diá-

Fig. 102.

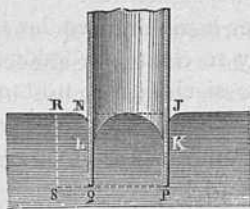
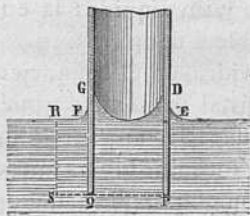
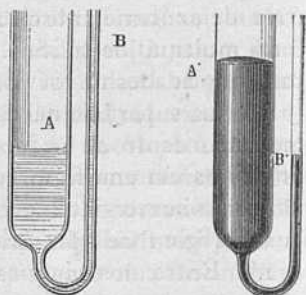


Fig. 103.

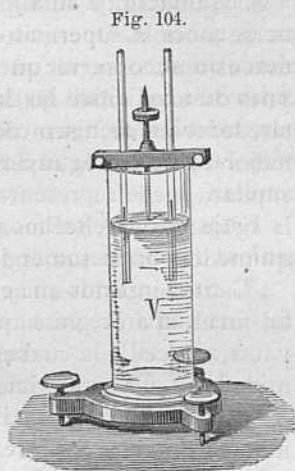


metro interior pasa de dos centímetros. Reemplazando el agua por el mercurio la elevacion se convierte en depresion, NJPQ (fig. 102) y A'B' (fig. 103), y la superficie terminal es convexa.

Los extremos curvos de las elevaciones y depresiones capi-

lares se llaman *meniscos*. En 1670 anunció Borelli que *dichas elevaciones y depresiones están en razón inversa del radio, en tubos de la misma sustancia*; y Laplace ha reconocido muy posteriormente que *tales desniveles alcanzan entre dos láminas paralelas la mitad de la altura que en un tubo de diámetro igual á la distancia entre las láminas*.

La demostración experimental de ambos enunciados es debida á Gay-Lussac, quien para comprobar la ley de Borelli, introdujo en un vaso de agua V (fig 104), cuyo borde bien esmerilado estaba en un plano horizontal, varios tubos capilares de diferente diámetro sostenidos por una tableta metálica: el nivel del agua en el vaso era marcado por la punta de un tornillo situado entre los tubos; los diámetros interiores de éstos habían sido previamente medidos con esmero; y la altura de las columnas capilares, ó sea la distancia desde el extremo inferior del tornillo al superior del agua dentro de los tubos, apreciábase desde lejos con ayuda de un anteojo.



La elevación del aceite en las mechas, la del agua en un terrón de azúcar, la absorción de los líquidos por las esponjas, y otra multitud de hechos análogos, tienen su explicación en estas propiedades de los tubos capilares.

5.º Entre dos láminas de cristal que formen un ángulo muy pequeño, ó dentro de un tubo cónico, una gota de agua se ahueca por ambos extremos, formando así en cada uno de ellos un menisco cóncavo, y además se precipita hácia la arista ó vértice: una gota de mercurio en iguales circunstancias ofrece dos meniscos convexos y se aleja del vértice.

6.º Dos cuerpos flotantes, mojados ó no mojados por el líquido, se precipitan uno hácia otro cuando están muy próximos; pero si uno de ellos es mojado y el otro no, se repelen manifiestamente.

7.º Al retirar del agua un tubo capilar queda en su extremo

una pequeña porcion de líquido terminada por un menisco convexo fuera del tubo y por otro cóncavo dentro: este fenómeno explica que sea posible sostener, y hasta hacer hervir, al agua en una vasija de vidrio cuyo suelo se halle formado por una tela metálica de malla no muy menuda (dos milímetros cuadrados); pues se observa que cada malla presenta al exterior un menisco convexo bastante pronunciado.

8.º Una aguja fina y ligeramete engrasada puede sostenerse sobre la superficie del agua por más que la densidad de ésta es mucho menor que la de metal que constituye á aquella; pues como el sólido no es mojado por el líquido, se forma á su alrededor un menisco convexo ó depresion, cuyo volúmen, ó mejor aun el del agua desalojada por el cuerpo y por la accion capilar, puede representar un peso de dicho fluido igual al de la aguja; y desde tal momento esta, segun el principio de Arquímedes, no se sumergirá.

Ciertos insectos que corren sobre el agua sin mojarse deben tal facultad á la grasa que barniza los grandes tarsos de sus patas, merced á la cual el líquido desalojado por dichas extremidades y por capilaridad pesa tanto como el insecto.

B—El calor modifica los fenómenos capilares de una manera notable: las elevaciones, por ejemplo, disminuyen de altura cuando la temperatura aumenta, hasta el punto de que Wolf, operando con el éter y con otros líquidos, ha llegado á comprobar la desaparicion total de dichas columnitas, y Drillon el cambio de las elevaciones en depresiones.

* 126—**A**—Aunque la índole de este libro no nos permite abordar la teoría de los fenómenos capilares, vamos á patentizar al ménos que la explicacion de los mismos cabe dentro de los conocimientos hasta ahora adquiridos.

B-a—Clairaut ha demostrado que *un cuerpo sólido es mojado por un líquido cuando la cohesion de las moléculas de éste vale ménos que el doble de la adhesion entre el líquido y el sólido, y no lo es si vale más*; respondiendole la forma curva de los meniscos al hecho de que la superficie de equilibrio de los líquidos debe ser siempre normal á la direccion de las fuerzas que solicitan sus moléculas, segun vimos (110-1.º) en el caso particular de la gravedad.

La elevacion ó la depresion dependen de la forma del menisco: si este es cóncavo, por ejemplo, (fig. 102), las moléculas CD que lo constituyen no solo están sostenidas, contrariando la gravedad, por

las fuerzas capilares, sino que en virtud de la cohesion, obrarán sobre las inferiores, atrayéndolas; y resultará en definitiva que una capa cualquiera SQP sufrirá ménos presion de arriba para abajo dentro del tubo que fuera, y que, como consecuencia, el líquido, para estar en equilibrio, habrá de subir en el tubo á mayor altura que el nivel exterior. De un modo análogo (fig. 103) se explican las depresiones.

b—Llamando *ángulo de conjuncion*, u , al formado por la superficie sólida con la tangente al menisco líquido en el contacto de ambas sustancias, por consideraciones basadas en la tension superficial se llega á la consecuencia de que si $u > 90^\circ$ habrá elevacion y si $u < 90^\circ$ depresion: el caso de la pared mojada parece corresponder al valor $u = 180^\circ$, exactamente segun Jamin, y solo de un modo aproximado en muchos de los líquidos dando fe á los trabajos de Quincke.

Respecto de la forma de los meniscos, observemos que la ecuacion (120 (1)) de la superficie capilar,

$$A \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) = P - d \zeta,$$

se trasforma en el caso de una lámina sumergida en un líquido, en

$$\frac{A}{R} = - d \zeta \quad (1),$$

admitiendo que en las inmediaciones de la pared plana, y paralelamente á ella, el radio de curvatura R' es infinito y por consiguiente, $\frac{1}{R'} = 0$, ó lo que es lo mismo que los meniscos son cilíndricos; y contando las presiones desde la superficie libre y horizontal del líquido, con lo cual $P = 0$. Y esta ecuacion (1) indica que el radio de curvatura R es de signo contrario al desnivel ζ ; ó en otros términos, que cuando el líquido se eleva contra la pared el menisco es cóncavo, y convexo si hay depresion.

c—Vemos, pues, que los hechos fundamentales pueden ser racionalmente explicados por distintos caminos.

C—La ecuacion (1) es aplicable al caso de la inmersion de dos láminas paralelas próximas, viendo, como hace un momento, en el menisco una porcion de cilindro: solo que, llamando e á la distancia entre las láminas,

$$\frac{e}{2} = R \cos u, \text{ y por consiguiente } R = \frac{2 \cos u}{e};$$

$$\text{luego } d \zeta e = - 2 A \cos u, \text{ y } \zeta = - \frac{2 A \cos u}{d e} \quad (2)$$

expresion que consigna la ley del fenómeno (125—A, 2.º).

Si $u > 90^\circ$, la altura ζ es positiva ó hay ascension; si $u < 90^\circ$, ζ es negativa ó representa una depression.

D—En el caso de tubos y suponiendo que los meniscos son casquetes esféricos, la ecuacion de la superficie capilar toma la forma

$$\frac{2 A}{R} = - d \zeta \quad (3)$$

y como, llamando r al radio del tubo,

$$r = R \cos u$$

la ecuacion (3) se convierte en esta

$$-\frac{2 A \cos u}{r} = d \zeta; \quad (4)$$

de la cual se deduce

$$\zeta = \frac{2 A \cos u}{d r}$$

fórmula que representa la ley de Borelli.

Si $u > 90^\circ$, ζ es positivo ó hay elevacion; si $u < 90^\circ$, ζ corresponde á una depression: cuando $u = 180^\circ$, la ecuacion (4) se trasforma en

$$\frac{2 A}{r} = d \zeta; \text{ de donde } A = \frac{r d \zeta}{2}$$

que nos da el valor de la constante capilar.

E—Los razonamientos anteriores suponen que las elevaciones y depresiones no dependen sino de las propiedades de la superficie terminal, y la experimentacion confirma en absoluto semejante modo de ver: las figs. 105, y 106 representan dos tubos de gran diámetro prolongados capilarmente desde cierto punto y sumergidos

Fig. 105.

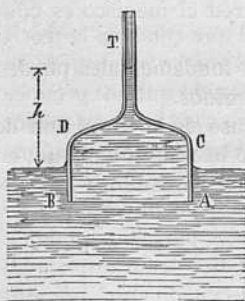
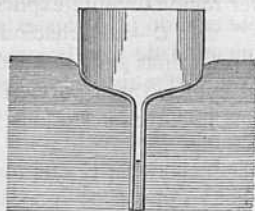


Fig. 106.



el primero en agua y el segundo en mercurio: en la 105 la altura h de la columna líquida es la misma que si el diámetro del tubo ABCDT fuese uniforme é igual al de la porcion T; y la fig. 106 nos ofrece el

fenómeno análogo en el caso de la depresion; observándose además que la menor porcion de sustancia extraña depositada en T modifica las propiedades superficiales del líquido y del sólido y el valor de la altura h , mientras que la presencia de dichas materias extrañas en cualquier otra parte del tubo es indiferente.

F—La influencia de la temperatura en los fenómenos capilares nada tiene de particular, desde el momento en que se recuerda la que el calor ejerce sobre las atracciones moleculares y sobre la tension superficial.

127—Los cuerpos sólidos porosos, cuyo interior puede considerarse cruzado en todos sentidos por finísimos conductos de distintos diámetros, ejercen una accion capilar enorme. Jamin ha dispuesto un aparato fundado en semejante circunstancia, dentro del cual se mueven los líquidos como en los vegetales; consiste en una vasija porosa, prolongada verticalmente segun un tubo de varios metros á cuyo extremo se adapta otra segunda capacidad porosa, todo ello completamente relleno de una sustancia porosa tambien, ó en polvo: introduciendo en arena húmeda una de las vasijas terminales, absorbe, al modo de las raices de las plantas, el agua, y la eleva hasta el extremo superior, donde se evapora, como por las hojas, por la superficie de la otra vasija.

Esta propiedad que tienen las sustancias porosas de absorber y retener cantidades de líquidos cuyo peso es con frecuencia superior al del mismo cuerpo sólido, ha sido llamada por algunos *imbibicion*.

* **128**—Entre las consecuencias interesantes á que conduce la teoría de la capilaridad citaremos la de que los vapores poseen ménos tension en contacto con una superficie cóncava del líquido que los produce que cuando la misma es plana, y en este último caso tambien ménos que en el de que la superficie sea convexa. Fenómeno que supone un nuevo y curioso origen de precipitacion de los vapores.

* **129**—Pudiera sospecharse si entre un sólido y un líquido que no lo moja no se realizará el hecho de la adhesion; y por ello, y aunque la conclusion de Clairaut (**126—B-a**) soluciona semejante duda, creemos oportuno recordar que el experimento citado en el número **14—B-e**, se practica lo mismo con el agua y el vidrio que con éste y el mercurio: la atraccion del sólido y el líquido es, pues, un fenómeno de existencia probada, así cuando el segundo moja al primero, como en el caso contrario.

§ VII. — VENA Y CORRIENTES LÍQUIDAS.

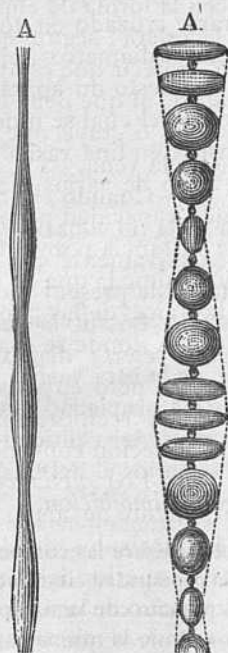
1.º—Constitucion de la vena.

130—A—Abriendo un orificio en las paredes de un depósito lleno de agua, la presión que se destruye contra la porción de pared suprimida determina el movimiento de salida del líquido por el agujero, ó sea la producción de lo que se llama un chorro ó *vena*. Según el punto en que el orificio se haya practicado la columna fluida que mane del mismo será vertical, descendente ó ascendente (surtidor), ó de una figura parabólica (salida lateral ú oblicua).

B—Suponiendo delgado el fondo del depósito, y un agujero circular en él, los fenómenos que la vena ofrece son los siguientes: hasta cierta distancia del orificio (fig. 107, A), está completamente tranquila y trasparente como un cilindro de cristal; pero despues, por el contrario, se presenta turbia, agitada y con hinchazones prolongadas de trecho en trecho, llamadas *vientres*, entre las cuales existen naturalmente porciones de chorro más delgadas ó *nodos*; unos

y otros atravesados al parecer por un eje central compacto. La columna líquida llena al salir todo el agujero; pero enseguida va estrechándose, y á una distancia casi igual á la longitud del diámetro de dicho orificio queda disminuida próximamente en la tercera parte, fenómeno que se conoce con el nombre de *contraccion de la vena líquida*. La segunda porción del chorro, ó sea desde algo más abajo de la sección contraída, parece formada por una lluvia de gotas, y así lo demuestra el

Fig. 107.



hecho de que cortándola muy rápidamente con una hoja de carton ésta resulta mojada en puntos separados y no segun un trazo continuo: mas para observar bien la constitucion de los nodos y de los vientres se debe operar en la oscuridad y alumbrando la vena con una luz viva de duracion instantánea; por cuyo procedimiento se descubren en ella séries de gotas perfectamente separadas (fig. 107, A'), unas pequeñas, á las cuales es debida la ilusion óptica de que el chorro tiene un eje central, y otras grandes, interpuestas entre las anteriores, que ofrecen la forma de elipsoides aplastados ó alargados, pasando por la esfera, segun que se encuentran en un vientre ó un nodo, es decir que están dotadas de un verdadero movimiento vibratorio al que debe indudablemente atribuirse cierto sonido muy bajo ó grave que se observa escuchando con atencion cerca de la vena.

C—Cuando el orificio de salida es poligonal la seccion de la vena no conserva su forma primera, sino que cambia de ella sucesivamente con la distancia al depósito líquido; pero no dejan de presentarse los nodos y vientres.

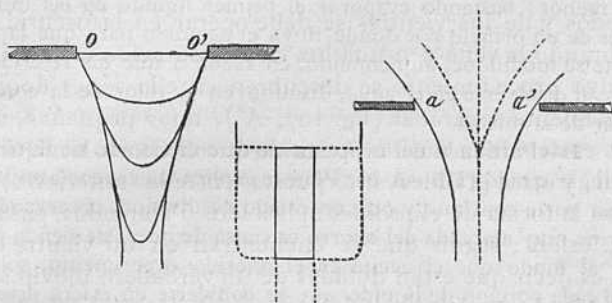
Segun Bossut la vena que sale por un orificio cuadrado ofrece á cierta distancia del mismo una seccion tambien cuadrada, pero cuyos vértices corresponden á los lados de la abertura, y recíprocamente; las caras, además, son cóncavas hasta la seccion contraída y convexas más allá.

D—Los *surtidores* verticales, ó sean chorros lanzados verticalmente de abajo arriba, tienen la misma constitucion que los acabados de describir, por más que el encuentro en la parte superior del líquido descendente con el que sube, dé á tal porcion de la vena un aspecto diferente del que se observa en los chorros que caen. Las venas oblícuas tampoco difieren esencialmente de las verticales, solo que la parte turbia está formada por diferentes haces de gotas, cada uno de los cuales describe una parábola distinta si bien todas estas se hallan situadas en el mismo plano vertical.

* 131—**A**—Se ha intentado explicar la contraccion de la vena como un efecto de la adhesion entre el líquido y los bordes del orificio de salida, atribuyendo á dicha fuerza cierta pérdida de velocidad de las moléculas próximas á los bordes, en virtud de la cual éstas quedarían retrasadas respecto de las del centro del chorro, y toda capa líquida

plana OO' (fig. 108) correspondiente al agujero tomaría en el des-

Fig. 108.



censo las formas curvas que indica el grabado. Cuyo mecanismo permite realmente concebir una disminucion gradual de la seccion de la vena, limitada por el momento en que, á causa de la cohesion del líquido, las moléculas de éste adquiriesen en cada capa del chorro un movimiento comun y la columna fluida conservase, como consecuencia, á partir del mismo, una seccion constante; solo que si tales razonamientos fueran exactos, aumentando la adhesión en el orificio se exagerarian tambien las proporciones del fenómeno de la contraccion, cuando precisamente sucede todo lo contrario, pues basta, en efecto, unir al agujero de salida un pequeño tubo cuyas paredes interiores sean mojadas por el líquido para que éste salga á boca llena y desaparezca la anomalía en cuestion.

La verdadera y más principal causa de la contraccion de la vena es la cohesion del líquido, que no permite al cilindro ó prisma recto (fig. 108, centro) situado sobre el orificio descender con independencia del resto del fluido que llena el depósito, sino que determina un arrastre mútuo de moléculas en virtud del cual las que desde todas direcciones se dirigen al orificio, lo verifican segun trayectorias oblicuas (fig. 108, aa') (visibles cuando el depósito es de cristal y existen en el líquido corpúsculos en suspension), y perturban en su caída á las que descenderian verticalmente, produciendo en definitiva un efecto análogo á si el orificio fuese de menor diámetro y estuviera situado fuera de la vasija. De cuya explicacion se deduce que la contraccion aumentará con la velocidad de salida y disminuirá si el orificio crece, todo lo cual se halla experimentalmente comprobado.

Los trabajos de Isarn, que ponen de relieve la existencia de cierta relacion entre la contraccion de la vena y la constante capilar del líquido, constituyen tambien una prueba importante de que el fenó-

meno que venimos estudiando es un efecto de cohesión: así el alcohol, cuya constante capilar es tres veces menor que la del agua, sale, en igualdad de circunstancias, más aprisa que ésta, y ofrece una contracción menor; bastando evaporar el primer líquido en las inmediaciones de un orificio por donde fluya el segundo para que la salida de éste se modifique, aumentando, en razón á que los referidos vapores, al disolverse en el agua, disminuyen el valor de la constante capilar de la misma.

B—Partiendo del experimento de cohesión de los líquidos en otro lugar citado (**115—A-c**), Plateau explica la existencia en la vena de una parte continua y otra en estado de división, observando que la forma muy alargada del chorro es causa de que éste tienda á dividirse al modo que el aceite en el referido experimento; solo que como cada porción de líquido que se convierte en esfera desciende un cierto espacio durante el tiempo que tarda en verificarlo, la vena parece compacta hasta el punto en que la completa separación en gotas tiene lugar, y turbia y dividida más allá. El paso rápido del líquido ante los ojos contribuye á la ilusión óptica de que la primera parte del chorro está tranquila; y la existencia de pequeñas gotas entre las grandes, que hemos reconocido (**130, B**) en la vena, establece una analogía más, dentro de la comparación de Plateau, entre la misma y su experimento.

C—Los vientres y nodos de la parte agitada de la vena, y el movimiento oscilatorio de las gotas, son fenómenos debidos á cierto estado de vibración del depósito líquido, y por lo tanto de los bordes del orificio de salida, procedente principalmente de las muchas conmociones que el suelo propaga y comunica á los cuerpos con él en contacto, y del golpe del chorro al caer; así que haciendo descansar sobre almohadillas la vasija que contiene el líquido, y recibiendo abajo la vena sobre un grueso plano que la corte oblicuamente y sobre el cual resbale sin sacudida alguna, la parte continua de la columna fluida se alarga, la parte turbia ofrece un diámetro casi uniforme sin vientres ni nodos, y las gotas adquieren una forma sensiblemente esférica: una nota de violon producida en las inmediaciones es suficiente para que los vientres y nodos reaparezcan en el chorro.

Notables experimentos de Savart, Plateau y Magnus permiten comparar la vena líquida á un instrumento músico de exquisita sensibilidad. Produciendo, en efecto, cerca de un chorro un sonido al unísono con el propio de éste (**130—B**) los vientres se pronuncian y regularizan más, y la parte transparente y compacta se acorta notablemente en razón á que el movimiento vibratorio más exagerado de las gotas tiende á su más pronta separación. Los sonidos discordantes afectan mucho menos á la vena, y casi nada si es gruesa.

2.º Enunciados de Torricelli, Bossut, L. de Vinci y Poiseuille.

132—A—Cuando un líquido sale por orificios practicados en pared delgada, su velocidad obedece á la siguiente regla descubierta por Torricelli: *las moléculas líquidas en el momento de la salida llevan la misma velocidad que adquirirían cayendo libremente en el vacío desde una altura igual á la distancia entre el centro de la abertura y la superficie de nivel del fluido en el depósito.*

La fórmula (**50—B** (4)).

$$v = \sqrt{2 g e}$$

de la velocidad de caída de los cuerpos, representará, pues, la de la salida de los líquidos, sustituyendo *e* (espacio) por *c*, *carga* ó altura desde el orificio al nivel. De donde se deduce que la velocidad de salida es, 1.º: *independiente de la densidad del líquido*, 2.º *proporcional á la raíz cuadrada de la carga.*

B—Se llama *gasto teórico* de un orificio á la cantidad de líquido que saldría por el mismo en un segundo segun el teorema anterior, y *gasto práctico* á la que realmente sale: este viene á ser dos tercios del primero por la contraccion de la vena.

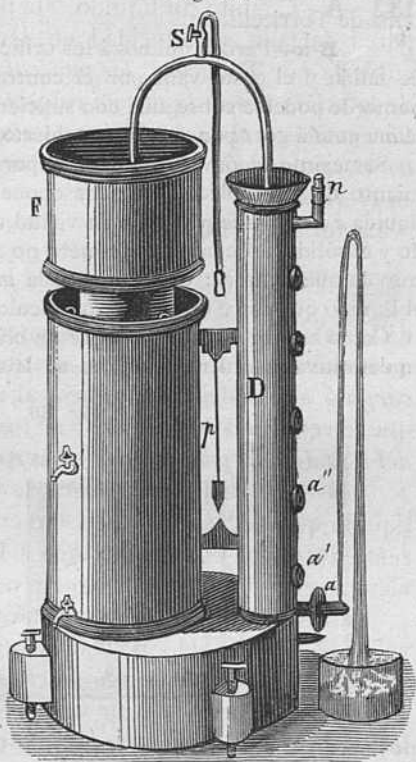
Para obtener un gasto constante hay precision de que la velocidad del líquido no varíe durante la salida, ó en otros términos, de que la carga se conserve la misma; lo que se consigue haciendo entrar en el depósito una cantidad de líquido igual á la que sale por el orificio, ó por otros medios.

C—El profesor Escriche es inventor de un ingenioso aparato de salida constante destinado á la demostracion del enunciado de Torricelli y de otros varios fenómenos.

Para comprender el fundamento de dicho instrumento basta observar que si en un depósito líquido indefinido tenemos flotando un cilindro de paredes laterales delgadas que contenga cierta cantidad del líquido exterior, cualquiera que sea la porcion del mismo que se añada ó quite dentro de la cavidad cilíndrica, el nivel en esta no cambiará, en razon á que el del depósito se conservará y el flotador se sumergirá ó emergerá siempre un volúmen igual al del líquido que se adicione ó sustraiga. Mas si el depósito líquido no es indefinido,

su nivel variará de altura cuando el flotador suba ó baje, y las circunstancias son diferentes; solo que el Sr. Escriche las elude, en el caso ordinario del empleo del agua, dando al depósito la forma cilíndrica que representa el grabado 109, en relacion con la del flotador F compuesto á su vez de dos cilindros incommunicados, uno interior cuya seccion es mitad que la del depósito y otro superior de igual diámetro que éste. Conseguido el nivel constante en F por tal combinacion, el profesor citado lo traslada al depósito D mediante un tubo de comunicacion, para mayor comodidad al experimentar; y en este depósito enchufa un tubo de cristal *n* donde se observa la invariabilidad de la altura del agua, y las llaves *a*, *a'*, *a''*,..... que permiten la salida vertical, oblicua ú horizontal de venas líquidas.

Fig. 109.



La regla de Torricelli se comprueba, habidas en cuenta las leyes de la gravedad, observando que el surtidor vertical que sale por *a* llega próximamente hasta la superficie del agua en *n* (y no exactamente por la resistencia del aire, entre otras causas): y la segunda consecuencia del mismo enunciado queda asimismo demostrada, midiendo los volúmenes líquidos que en igual tiempo salen por los orificios *a'*, *a'*.....

* 133—A—Cuando la abertura del depósito no está practicada en pared delgada, ó cuando, estándolo, se adapta á ella un tubo adicional cilíndrico ó cónico, cuya longitud no exceda de tres á cuatro veces

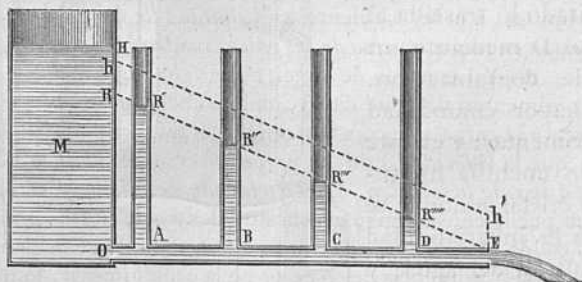
su diámetro, puede suceder que no haya adherencia entre la vena y las paredes interiores del tubo, y entónces éste ninguna influencia ejerce; ó que la haya, y en tal caso se modifica el gasto hasta poder llegar á ser mayor, segun Venturi, de lo que corresponde por el teorema de Torricelli.

B-a—Pero si unimos á los orificios tubos largos, la velocidad de salida y el gasto van, por el contrario, disminuyendo hasta el punto de poderse conseguir, con suficiente longitud, que el líquido mane gota á gota por el extremo abierto y aun que no corra.

Semejante fenómeno se explica por la resistencia que al movimiento de las moléculas fluidas opone la adherencia de una capa líquida á las paredes del tubo en virtud de la atraccion entre el líquido y el sólido, así cuando el primero no moja al segundo, como en el caso de que lo moje; capa que queda *inmóvil*, y cuya cohesion con el líquido que corre origina un obstáculo al movimiento.

Como la carga ó presión sobre un orificio de salida O (fig. 110) es en definitiva una fuerza, la parte de la misma que no se emplee en

Fig. 110.



mover el líquido se conservará bajo la forma de presión contra las paredes del tubo OE: ahora que, suponiendo recto á éste y de diámetro constante, la resistencia crece evidentemente con la longitud; y como, una vez establecido el régimen, la velocidad es uniforme en OE puesto que la misma cantidad de agua entrará por O que saldrá por E, la presión no puede menos de variar á lo largo del conducto. Colocando, en efecto, varios tubitos verticales de cristal, A, B, C, D, á distancias iguales, mientras el agua sale por E, se sostienen en ellos las columnas líquidas AR', BR'',... el peso de cada una de las cuales mide la presión contra un punto de la pared; y la circunstancia de encontrarse sus extremos en línea recta con E, patentiza la ley de variación de la presión á lo largo del tubo. Por manera que la carga total sobre O, en el depósito M, se divide del modo siguiente: la porción representada por la altura OR se emplea en vencer la resistencia

al movimiento del líquido dentro del conducto OE; la Rh , igual á Eh' , corresponde, según la regla de Torricelli, á la velocidad con que el agua sale por E; y la hH , llamada *altura de resistencia al paso*, equilibra la perturbacion que en el líquido produce la salida.

Para medir la presión sobre un punto de un conducto T (fig. 111), basta ajustar en él un tubo de vidrio, M, con mercurio dentro, y la diferencia de nivel entre sus dos ramas indicará la de las presiones entre el interior y el aire.

b—Dedúcese de lo dicho que tal presión será tanto menor cuanto mayor sea la velocidad, y valdrá cero cuando el líquido corra según el enunciado de Torricelli; y hasta llegará á convertirse en una especie de succión hácia adentro si la velocidad, como en algunos tubos cortos, excede de la indicada por dicho teorema.

c—La disminución del gasto producida por un tubo horizontal largo de sección uniforme, obedece, según Bossut, dentro de ciertos límites, á la ley siguiente: *en igualdad de carga y tiempo los gastos están en razón inversa de las raíces cuadradas de las longitudes.*

d—Y Leonardo de Vinci, observando que una vez establecido el régimen en un conducto ó canal de anchura variable, mientras se conserva la carga sale constantemente la misma cantidad de agua, dedujo que *la velocidad está en razón inversa del calibre* (según su frase), *ó sea de la sección, ó del cuadrado del diámetro*: regla que tampoco puede considerarse exacta sino dentro de ciertos límites.

Los codos, llaves, etc., modifican algún tanto la velocidad.

C—La influencia del espesor de la capa inmóvil, lo mismo si el líquido moja al sólido, que cuando no lo moja, es tan grande en los tubos capilares, á causa de la pequeñez del diámetro, que los líquidos al salir por tales conductos no obedecen á la ley de Leonardo de Vinci ni á ninguno de los principios anteriores. Poiseuille, estudiando este caso por medio de ampollas de vidrio, como la I I' (fig. 112), en comunicacion por uno de sus extremos con un depósito de aire comprimido á presión constante, y terminadas por el otro en un tubo capilar, ha encontrado las leyes siguientes:

1.^a *Para un mismo tubo el gasto está en razón directa de la presión ejercida sobre el líquido.*

Fig. 111.

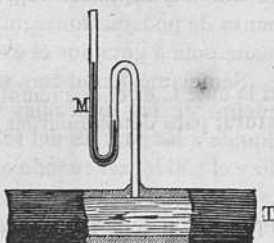
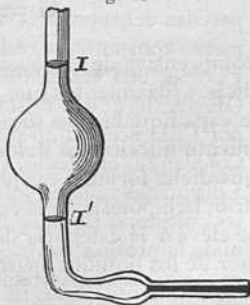


Fig. 112.



2.^a A igualdad de presión, longitud del tubo, y sustancias, el gasto es proporcional á la cuarta potencia de los diámetros.

3.^a A igualdad de presión, diámetro y sustancias el gasto está en razón inversa de la longitud.

4.^a En un mismo tubo y á igual presión, el gasto varía de unos á otros líquidos, y aumenta con la temperatura.

Estas leyes pueden representarse por la siguiente fórmula

$$G = C \frac{p d^4}{l}$$

en la cual C es el coeficiente dependiente del líquido y de la temperatura; para determinar su valor

$$C = \frac{G l}{p d^4}$$

la presión p debe expresarse en gramos por centímetro cuadrado, y el diámetro d y la longitud l en centímetros.

La Fisiología, así vegetal como animal, saca gran partido del descubrimiento de Poiseuille para la explicación de ciertos fenómenos.

La filtración, según los trabajos de Graham y Tate, es la salida de un líquido á través de un sistema complejo de conductos capilares y sus circunstancias se hallan en bastante acuerdo con las anteriores leyes.

3.º Rozamiento interior de los líquidos.

* 134—La resistencia que destruye la velocidad en los tubos así largos como capilares pudiera atribuirse al doble rozamiento del líquido con el sólido y de las moléculas fluidas entre sí; pero el cálculo conduce á la siguiente fórmula del gasto en un tubo capilar

$$G = \frac{\pi p r^4}{128 c l} = \frac{\pi p d^4}{128 c l}$$

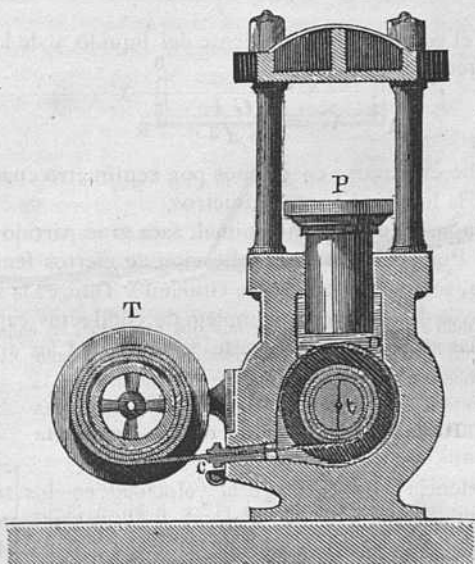
comprensiva de las leyes de Poiseuille, independiente del primero de dichos rozamientos que se supone infinito ó sea nula la velocidad de la capa líquida que toca al tubo, y en la que c representa el rozamiento interior del fluido; y como la experimentación ha demostrado que dicha fórmula es aplicable al agua y al mercurio en tubos de vidrio, la hipótesis de la *capa inmóvil*, de que antes nos hemos servido, se eleva á la categoría de hecho comprobado, y el rozamiento interior de los líquidos aparece como causa real y única de la resistencia al movimiento de los mismos dentro de conductos.

De las expresiones anteriores se deduce fácilmente el procedimiento para determinar el valor del coeficiente c de rozamiento interior.

APLICACIONES.

135—La *prensa hidráulica* es un aparato ó máquina destinado á ejercer presiones considerables. La fig. 113 representa una de las disposiciones más sencillas que se le han dado: consiste en un depósito, D, de paredes de hierro muy resis-

Fig. 113.



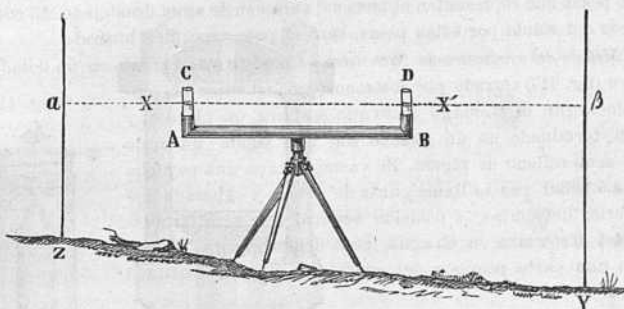
tentes, lleno de agua, en cuyo interior lleva un tambor *t* al que puede imprimirse desde fuera un movimiento de rotacion alrededor de su eje: un ancho orificio circular situado en la parte superior del depósito da paso á un grueso pistón cilíndrico que sostiene la plataforma P, sobre la cual se colocan los cuerpos que hayan de ser comprimidos, y otro lateral C, estrecho y convenientemente dispuesto, permite la entrada á una cuerda arrollada sobre el tambor exterior T cuando la máquina no funciona. La plataforma P está rodeada por fuertes columnas de hierro que sostienen otra pieza de gran resistencia, plana por su cara inferior y sólidamente sujeta á las mismas, entre la cual y P verifican la compresion de los cuerpos cuando se eleva el grueso pistón cilíndrico.

Para que el aparato trabaje basta dar vueltas al eje de *t*, pues con ello la cuerda irá arrollándose en el tambor interior, y como el depósito D se encuentra lleno de agua el volúmen de la cuerda ya entrada desarrolla contra las paredes del mismo presiones enormes que determinarán la elevacion de P.

En lugar de la cuerda puede introducirse, á viva fuerza tambien, dentro de D,

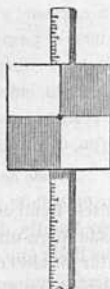
por una abertura como la C provista de una tuerca, un tornillo de bastante diámetro cuya cabeza esté constituida por un gran volante; ó bien cierta cantidad de agua: el resultado es el mismo, y la presión sobre la base del grueso pistón cilíndrico se puede calcular fácilmente por medio del principio de Pascal (del cual la prensa es aplicación inmediata), y de las leyes de las palancas ú órganos que intervengan en el desenvolvimiento de presiones en el agua que llena el depósito D. 136.—*El nivel de agua* (fig. 114) es una aplicación de las condiciones de equilibrio en vasos comunicantes (110, 7.º). Consiste en un tubo de hoja de lata ó de

Fig. 114.



latón AB, acodillado en ángulo recto por sus dos extremos, en cada uno de los cuales enchufa un cilindro abierto de cristal, C y D; colocado el instrumento sobre un trípode y echando agua en su interior, la recta XX' tangente á la superficie del líquido en las dos ramas verticales AC y BD será horizontal y puede utilizarse para ver la distancia al suelo de los puntos lejanos a y b, situados en la misma. Al efecto, se colocan reglas verticales aZ y bY (miras) divididas en centímetros, provistas de una placa metálica (figura 115) llamada *vivo*, con un punto en su centro al cual debe enfilarse la visual; y una vez que los centros de los vivos están en la recta a X X' b, las mismas reglas marcan la distancia al suelo.

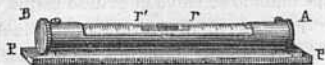
Fig. 115.



El nivel así determinado es el *aparente*, ó sea el que corresponde á puntos situados sobre un plano tangente á la superficie del globo; el nivel *verdadero* es el que corresponde á puntos igualmente distantes del centro de la tierra.

137—*El nivel de aire* es más sensible y de más precisión que el de agua. Consiste en un tubo de cristal ligerísimamente encorvado en su medio $r'r'$ (fig. 116), que se llena de agua no dejando en él más que una burbujita de aire, cerrado por sus extremos, y protegido por un estuche metálico AB que solo descubre la parte superior del tubo: la cajita cilíndrica así constituida va fija á una tableta metálica PP, bien planeada por su cara inferior; y todo está arreglado de manera que cuando el instrumento descansa sobre una superficie horizontal, la burbuja de aire, que siempre tenderá á ocupar la parte más alta, se sitúa entre las dos rayitas r y r' .

Fig. 116.



138—Como aplicación del principio de Arquímedes (110, 6.º) pueden citarse los siguientes procedimientos para determinar el peso específico (21—D) de los sólidos.

1.º *Método de la balanza hidrostática.*—Se coloca el cuerpo en uno de los platillos de este aparato (fig. 80), y añadiendo pesas en el otro tendremos el peso del sólido: enseguida se le suspende del ganchito del mismo platillo por medio de un hilo muy delgado, (á veces se ata en el otro platillo un hilo casi igual), y acercando una copa con agua de modo que el sólido quede sumergido, la balanza saldrá de la posición de equilibrio y no volverá á ella sino colocando en el platillo del cuerpo pesas que representen el peso del volumen de agua desalojado. El cociente del peso del sólido por estas pesas, será el peso específico buscado.

2.º *Método del areómetro de Nicholson.*—Consiste este aparato en un flotador cilíndrico (fig. 117) cerrado por dos conos; uno, el superior, prolongado segun un vástago recto que sostiene un platillo; y el otro terminado en un gancho del que pende un cesto cónico semi-relleno de plomo. El vástago lleva una pequeña muesca ó señal que se llama punto de *enrase*; y el pesado lastre inferior determina la posición vertical y de equilibrio estable del areómetro en el agua, pero dejando fuera de este líquido una parte pequeña del aparato y toda la varilla ó vástago.

Para determinar el peso específico de un sólido, se colocan primero pesas en el platillo superior hasta que el aparato *enrase*, sustituyéndolas enseguida por un trocito del cuerpo en cuestion, mas las pesas necesarias para que el areómetro vuelva á enrasar; y la diferencia entre unas y otras pesas representará el peso del cuerpo. Conseguido este segundo enrase se baja el cuerpo á la cestilla cónica, sin tocar á las pesas, y el aparato emergerá, siendo preciso añadir en el platillo superior, para enrasar por vez tercera, pesas que representen el peso de un volumen de agua igual al del cuerpo, ó sea el segundo dato que necesitamos para hallar el peso específico.

3.º *Método del frasco.*—Es aplicable, con ventaja, cuando los sólidos se encuentran en estado pulverulento. Practicase por medio de una pequeña botella de boca ancha (fig. 118) provista de un tapon esmerillado que se prolonga al exterior bajo la forma de tubito capilar terminado en un ensanchamiento ó vaso: en este tubo hay una señal *t* hasta la cual se debe llenar de agua el frasco en cada pesada. Las manipulaciones que se efectúan en una operación son las siguientes: primero se pesa el cuerpo: después el frasco lleno de agua hasta *t*; introdúcese enseguida el sólido adentro, se recoge entre papeles secantes el agua desalojada y se cierra el frasco de modo que el líquido llegue á *t*; procédese á pesar nuevamente; y la diferencia entre esta tercera pesada y la suma de las dos primeras representará el peso de un volumen de agua igual al del cuerpo ó sea el número por el cual debe dividirse el peso de éste

Tanto en el presente como en los anteriores métodos, si el sólido fuera soluble

Fig. 117.

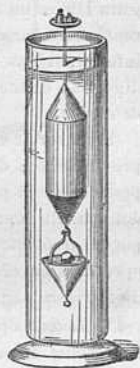


Fig. 118.



en el agua, se sustituye tal líquido por otro en que no lo sea, y el peso específico hallado con relación al nuevo líquido multiplicado por el de éste respecto del agua dará el del sólido que se buscaba. Los cuerpos porosos ó ménos densos que el agua exigen manipulaciones un poco más complicadas.

139—Análogamente se pueden determinar los pesos específicos de los líquidos por los tres siguientes procedimientos.

1.º *Método de la balanza hidrostática.*—Se cuelga en el gancho de uno de los platillos de este aparato un trozo de platino ó de vidrio, y se establece el equilibrio en la balanza con una tara cualquiera: se sumerge enseguida sucesivamente dicho sólido en el líquido y en el agua; y los pesos que para restablecer el equilibrio sea preciso añadir en el primer platillo representan respectivamente los de igual volumen de los dos fluidos.

2.º *Método del areómetro de Fahrenheit.*—Este instrumento (figura 119) es un flotador parecido al de Nicholson, del cual se diferencia en estar construido de vidrio, y en carecer de cestilla cónica inferior, si bien va lastrado con una pequeña esfera llena de perdigones ó de mercurio; el vástago superior lleva también su punto de enrase.

Para servirse del areómetro de Fahrenheit es preciso pesarlo previamente; después se le sumerge en agua pura añadiendo pesas sobre el platillo hasta que enrase; y estas pesas más el peso del aparato representan el peso del volumen de agua desalojado por el areómetro hasta el punto de enrase; repitiendo idéntica operación en el líquido cuyo peso específico se busca, solo faltará dividir este segundo dato por el primero.

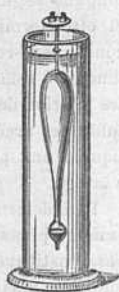
3.º *Método del frasco.*—Úsase una botellita algo menor que la empleada para los sólidos. Para trabajar con ella se la coloca, bien limpia y seca, en una balanza, equilibrándola con perdigones ó arena; se la llena después de agua hasta la señal del tubito capilar y se la vuelve á colocar en la balanza; y el peso que sea preciso añadir para restablecer el equilibrio, representa el del agua contenida hasta *t*. Vacía el frasco, secándolo y repitiendo la operación con el líquido, tendremos el segundo número que se pide á la experimentación.

140—Existen una porción de areómetros, cuyo estudio es propio de tratados especiales, destinados á medir de una manera aproximada, pero rápida, la densidad, la riqueza, la concentración ó la pureza de los líquidos. Entre los varios densímetros, volúmetros, alcohómetros, pesa-sales, etc., citaremos solo uno de los primeros.

El densímetro de Rousseau se diferencia del areómetro de Fahrenheit en que la varilla es más larga, va graduada, y termina en una medida de centímetro cúbico. La escala se construye dividiendo en veinte partes iguales la porción del vástago comprendida entre las líneas de flotación cuando el aparato se sumerge en agua á 4.º solo y cargado con un gramo, y prolongando la graduación cuanto lo permita la varilla. Como cada división representa 0,05 gramos, y un centímetro cúbico de agua sumergirá al areómetro hasta el grado 20 ($20 \times 0,05 = 1$, gramo y densidad del agua), la densidad de un líquido será el producto del número 0,05 por el grado que marque el instrumento cargándolo con un centímetro cúbico del mismo.

Una pequeña modificación de que somos autores permite aplicar este aparato á la determinación de las densidades de los sólidos.

Fig. 119.



CAPÍTULO III.

ESTADO GASEOSO.

§ I.—LEY DE MARIOTTE.—TEORÍA DE LOS GASES.

141—A—Sabemos que los gases están caracterizados (**13-B-d**) por la *expansibilidad* ó propiedad de llenar siempre un recinto de capacidad creciente en que se encuentren, por grande que llegue á ser; que, á la inversa (**20-B-b**), disminuyen de volúmen en proporciones considerables sujetándolos á presiones adecuadas; y que (**14-B-g**) se da el nombre de *tension* ó *fuerza elástica* al esfuerzo que constantemente están ejerciendo contra las paredes de las vasijas que los contienen.

La expansion de los gases va acompañada de un enfriamiento de la masa, y su compresion de un desprendimiento de calor; mas por ahora prescindiremos de semejantes cambios, análogamente á lo que hemos hecho al estudiar los líquidos y los sólidos, y supondremos invariable la temperatura, séalo ó nó, al apreciar los fenómenos en que vamos á fijar nuestra atencion.

B—El físico francés Mariotte estableció en el siglo xvii la siguiente ley referente á la anterior propiedad característica de los gases: *los volúmenes ocupados por un gas están en razon inversa de las presiones que sufre y ejerce, ó sea de sus tensiones ó fuerzas elásticas.*

De manera que llamando p y p' , v y v' á las presiones y á los volúmenes de una misma masa en dos circunstancias distintas, pero á temperatura constante, tendremos

$$\frac{p}{p'} = \frac{v'}{v}; \text{ ó bien } pv = p'v'; \text{ ó bien } pv = \text{constante}$$

Partiendo, pues, de un *volúmen* y de una *tension*, en una cantidad de gas, iguales á uno, si el primero se *duplica*, *triplica*,

cuadruplica, etc., la segunda no valdrá sino la *mitad*, *tercera*, *cuarta parte*, etc.; y si el volúmen se reduce al *medio*, *tercio*, *cuarto*, etc. del primitivo, la tension se hará *dos*, *tres*, *cuatro*, etcétera, veces mayor que la inicial.

142—A—La expansibilidad y la fuerza elástica de los gases, así como los fenómenos en general del estado gaseoso, se explican perfectamente por medio de una hipótesis cuya primera concepcion es debida á Daniel Bernouilli, y sus últimos perfeccionamientos, que la han convertido en teoría de los gases, á Clausius y á Maxwell. Consiste en suponer á los cuerpos, en este estado constituidos por infinidad de moléculas tan pequeñas que en comparacion con su tamaño son grandes las distancias que las separan, y animadas de considerables velocidades de traslacion. Como las *colisiones* ó choques serán muy frecuentes, y en ellos cambiarán las direcciones de los movimientos rectilíneos moleculares, en definitiva no resultará favorecida ninguna direccion, y puede decirse que cualquier porcion de una masa gaseosa se encontrará igualmente agitada en todos sentidos por los movimientos de traslacion de sus moléculas. Es indiferente admitir que las particillas del gas llegan á ponerse en contacto en cada colision, ó que ejercen accion unas sobre otras con solo acercarse á distancias muy pequeñas; pero tanto sus choques mútuos, como *los que tienen lugar contra las paredes de la vasija y constituyen la presion*, se verifican, segun la presente hipótesis, con arreglo al principio de conservacion de la energía, es decir de manera que la suma de las fuerzas vivas de todas las moléculas permanece constante.

La fuerza viva de cada molécula puede considerarse formada por la correspondiente á su movimiento de traslacion (el producto de la masa, m , de la misma por el cuadrado de la velocidad, v^2 , de su centro de gravedad), y la que suponen los movimientos interiores, rotaciones y vibraciones, de que dicha particilla es asiento; pero en una masa gaseosa de temperatura invariable deben verificarse incesantes trasformaciones de la fuerza viva de traslacion en de rotacion y vice versa, si bien á causa del inmenso número de moléculas componentes de la más pequeña porcion de gas, se establecerá siempre una compensacion entre las dos clases inversas de trasformaciones.

Se llama *camino libre de una molécula* al que recorre entre cada dos colisiones consecutivas. El número de colisiones, como se comprende, debe disminuir y el camino libre crecer, cuando el gas aumenta de volúmen.

Aunque en cada momento existirán en cualquier masa gaseosa velocidades de traslación molecular muy diferentes, dáse el nombre de *velocidad* de las moléculas de un gas á la *velocidad media* de todas ellas.

* **B-a**—Consideraciones analíticas en que no entramos, fundadas en la precedente hipótesis, conducen á la siguiente ecuacion:

$$P V = \frac{1}{3} n m v^2 = \text{constante (1)}$$

que representa la ley de Mariotte: P es la presión y V el volúmen del gas; m la masa de cada molécula, n su número, y v su velocidad.

b—Gay-Lussac estableció que todos los gases tienen el mismo coeficiente de dilatación; ley de que es expresión la fórmula

$$P V = \frac{1}{273} P_0 V_0 (273 + t).$$

Sustituyendo por PV su valor según la ecuación (1) tendremos

$$\frac{1}{3} n m v^2 = \frac{1}{273} P_0 V_0 (273 + t) \quad (2);$$

donde se ve que la fuerza viva media mv^2 del movimiento de traslación de una molécula gaseosa es proporcional á la temperatura del gas contada desde el cero absoluto.

c—Suponiendo que la masa gaseosa pesa un kilogramo, ó sea $n m = \frac{1}{g}$; que $t = 0^\circ$; y llamando d á la densidad del gas respecto del aire, el valor de v sacado de la fórmula (2), es

$$v = 485 \sqrt{\frac{1}{d}}$$

ecuación que indica que la velocidad media de traslación de las moléculas varía en razón inversa de la raíz cuadrada de la densidad del gas. Reemplazando por d su valor en los diferentes gases tendremos la velocidad media de sus moléculas en metros; hé aquí algunas:

Aire.	485 m
Oxígeno.	461
Nitrógeno.	492
Hidrógeno.	1848

d—De lo dicho se deduce que las dos partes que componen la fuerza viva total de un gas pueden ser consideradas separadamente y en promedio como constantes; y el cálculo establece la razón ó cociente 0,6315 entre la fuerza viva de traslación y la total, con absoluta independencia de la presión y de la temperatura.

143—A—El conocimiento de la tensión es tan esencial tratándose concretamente de una masa gaseosa, que sin la expresión de tal circunstancia el verdadero estado de la misma queda indeterminado. De aquí la necesidad de que, sin pasar adelante, demos idea de algunos de los aparatos, llamados *manómetros*, inventados para medir dicha fuerza.

B—La unidad adoptada para valorar la presión de los gases y vapores es la *atmósfera*, medida equivalente al peso de una columna de mercurio á 0° cuya altura sea 0,76^m y que tenga por base la misma superficie sobre que obra el gas. Los múltiplos y divisores del centímetro se emplean también con frecuencia para indicar tensiones, haciendo referencia á alturas de columnas de mercurio; en tal sentido se dice presión de 20 metros ó de 3 milímetros. Antes de ahora (**112-B**), aunque sin darle este nombre, hemos hecho uso de la unidad *atmósfera*, cuyo origen es el hecho de ser ella el valor de la presión del gas atmosférico á la temperatura de cero y al nivel del mar.

C—Son generalmente conocidos los tres siguientes manómetros:

1.º *Manómetro de mercurio ó de aire libre*.—Consiste (fig. 120) en una cavidad de ciertas dimensiones y de paredes resistentes, C, llena de mercurio, en la cual se introduce casi hasta el fondo un tubo de vidrio VT de varios metros de longitud, abierto por ambos extremos, y dividido en porciones de 76 centímetros y fracciones, ó en metros y centímetros. Puesto el gas ó vapor en comunicación con el depósito de mercurio, si su presión es igual á la de la atmósfera, ó sea de *una atmósfera*, el líquido metálico no se moverá; pero si fuese de *dos, tres, etc., atmósferas*, el mercurio subirá dentro del tubo, 76, 152 centímetros, etc.

Fig 120.



Antes de operar, Regnault secó perfectamente el tubo bb' , é inyectando enseguida agua en V , hizo que el mercurio subiese á la altura de la llave r : despues estableció por esta la comunicacion de bb' con el depósito de aire ó gas comprimido, con lo cual el mercurio bajó hasta que al llegar al punto α , Regnault cerró la llave, obteniendo así en ra' un volúmen ν de gas á una presion p determinable en dd' . A continuacion llenó de agua fria el ancho cilindro de cristal, é inyectó igual líquido en V para que el mercurio subiera así en bb' como en dd' ; y haciendo alto en el trabajo cuando el metal alcanzó la raya β , y el volúmen del gas se habia reducido casi á la mitad ν' midió la presion p' correspondiente con el manómetro dd' .

Corregidos los experimentos de las diversas causas de error, Regnault buscó si se realizaba la ecuacion

$$p \nu = p' \nu' \text{ ó bien } \frac{p\nu}{p'\nu'} = 1 :$$

encontrando que ningun gas la satisface sino de una manera aproximada, pues todos se comprimen algo más de lo que indica la ley de Mariotte, á excepcion del hidrógeno cuya reduccion efectiva de volúmen es menor que la teórica; con la particularidad de que dentro de los límites en que operó dicho físico la compresibilidad de este último gas disminuye más aún cuando la presion aumenta, miéntras que los restantes gases son tanto más compresibles cuanto mayor es la presion.

b—Las diferencias entre los volúmenes ocupados por los gases y los que debieran ocupar con arreglo á la ley de Mariotte son, sin embargo, tan pequeñas á las temperaturas y presiones más usuales, que, prácticamente, miéntras no se trate de investigaciones delicadas, puede admitirse sin error sensible la exactitud completa de dicha ley de compresibilidad y elasticidad de los referidos fluidos. Y como en la expresion

$$V P = V' P'$$

V y V' representan una misma masa, se verificará (21)

$$V D = V' D' \text{ y por lo tanto } P D' = P' D;$$

es decir, que *la densidad de un gas es proporcional á su presion.*

B—Regnault solo extendió sus experimentos hasta 27 atmósferas; pero Cailletet y Amagat han rebasado tal límite y llegado á la consecuencia de que los gases no fácilmente

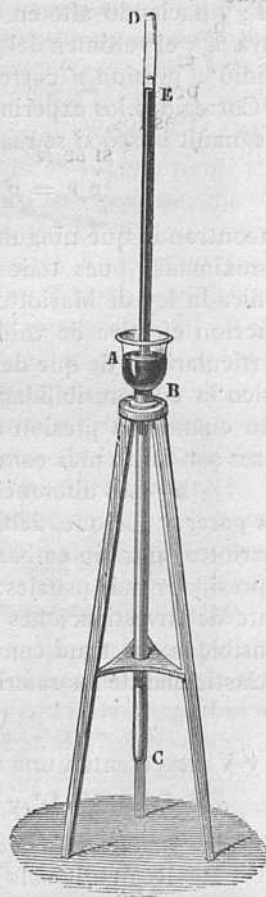
liquidables se comprimen más de lo indicado por la ley de Mariotte hasta una cierta presión, pasada la cual se conducen como el hidrógeno, es decir, discrepan de dicha ley en sentido inverso. La presión límite parece ser 60 metros de mercurio para el nitrógeno; 100 para el oxígeno; 65 para el aire; 50 para el óxido de carbono, etc.

* C—Acerca de la compresibilidad de los gases á presiones inferiores á la atmosférica apenas se tiene conocimiento alguno.

Son antiguos los experimentos con el *barómetro de cubeta profunda*, aparato (fig. 123) compuesto de un tubo de vidrio DE cerrado por el extremo superior y dividido en partes de igual capacidad, destinado á ser sumergido en un depósito largo y estrecho, ó *cubeta profunda*, ABC, que lleva mercurio. Lleno el tubo de este líquido metálico se introduce en el mismo un pequeño volumen de aire ó de otro gas y se le hace bajar dentro de la cubeta hasta que el nivel del mercurio sea idéntico dentro y fuera de DE (lo que supone la presión interior igual á la de la atmósfera); y elevándolo después hasta que el volumen del gas se duplique, triplice, etc., y comparando la altura de la columna mercurial que en el mismo aparece con la del barómetro, las diferencias $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ etc. de la de este aparato, indican presiones interiores conformes con la ley de Mariotte.

Pero nótese que dadas la pequeñez de las discrepancias entre la compresibilidad real de los gases y la teórica según la referida ley, las circunstancias de estos experimentos, y su escasa extensión, toda vez que pueden tenerse gases con una millonésima de atmósfera, y aun mucho ménos, de presión, los resultados del barómetro de cubeta profunda dejan intacta la cuestión.

Fig. 123.



Lo mismo puede decirse de las investigaciones modernas de Mendeleeff, Kirpitchoff y Siljestróm.

* **D**—Cuando los gases comprimidos están próximos á pasar al estado líquido se conducen exactamente como vapores, y no obedecen ni aun aproximadamente á la ley de Mariotte.

E—Como los trabajos experimentales de que venimos haciendo mérito son á temperatura constante, Amagat ha realizado algunos á temperaturas comprendidas entre 100° y 320° , y de ellos se deduce que los gases tienden á satisfacer la ley de Mariotte á medida que su temperatura se eleva. No sabemos si el hidrógeno se conducirá en tal caso lo mismo que los restantes, ó si por el contrario, como supone Reye, será preciso enfriarlo hasta 41 grados bajo cero para que obedezca á la citada ley.

145—Los hechos anteriores no han podido hasta el presente ser interpretados de una manera segura. La nocion hipotética de un *gas perfecto* que ofrezca una compresibilidad normal conforme con la ley de Mariotte acaso pueda realizarse en cada sustancia á determinada temperatura, más abajo de la cual cabe atribuir á un efecto de *cohesion entre las moléculas de los gases* la mayor compresibilidad de éstos; y más allá de cuyo *punto crítico* Crookes supone que se inicia la trasformacion del gas en materia radiante, ó sea el tránsito á un *estado ultra-gaseoso* de los cuerpos; pero la experimentacion está aun léjos de dar valor á semejantes conjeturas.

Los gases ordinarios dentro de tal concepcion serian *gases imperfectos*; ó en otros términos, deberian admitirse diversos grados de gaseidez ó fluidez gaseosa, como evidentemente los hay de liquidez y de solidez.

Aceptando además con Crookes que el tránsito al estado ultra-gaseoso se verifica de una manera insensible, de tal modo que en un mismo recinto pueden coexistir el gas y el ultra-gas, el hidrógeno sería ejemplo de un gas que en parte ha rebasado el *punto crítico* á la temperatura y presion ordinarias.

La hipótesis de que el estado de los gases, cuando llegan al momento de su máxima compresibilidad, pueda ser idéntico al del hidrógeno en las circunstancias ordinarias, fundada en el hecho de que á partir de dicho instante tales fluidos se hacen ménos compresibles, no parece muy aceptable dada la tenuidad del hidrógeno y otros varios fenómenos.

APLICACIONES.

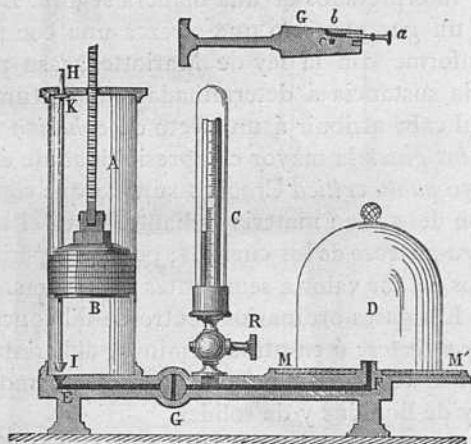
146—Por más que no entra en nuestro propósito interrumpir la exposicion de doctrinas con descripciones de aparatos que sean aplicaciones de las mismas, y por ello venimos reservándolas para el final de los capítulos, no puede proseguirse el estudio de los gases, sin tener idea de dos clases de instrumentos que sirven para manejarlos; *las máquinas neumáticas y contra-neumáticas*, destinadas respectivamente á extraer aire ú otro gas del recinto que lo contenga (operacion llamada *enrarecer ó hacer el vacío*), y, por el contrario, á inyectarlo.

147—**A**—La antigua máquina neumática (fig. 124) de un cuerpo de bomba que generalmente existe arrinconada en los gabinetes de Física es á propósito para dar á conocer el mecanismo y la teoria de las máquinas de dos cuerpos más generalmente usadas.

Consiste en un cilindro de cristal A, puesto en comunicacion por el conducto EF con un disco MM', llamado *platina*, sobre el cual se colocan las vasijas, como la campana D, en las cuales quiere hacerse el vacío. El cuerpo de bomba está provisto de un émbolo ó piston B, que puede subir ó bajar por medio de un vástago; y atravesando el espesor de éste á rozamiento suave juega la varilla metálica KI terminada inferiormente en una válvula cónica I y armada arriba de un tope K. Esta válvula I abre y cierra uno de los extremos del tubo EF; pero además existe otra en el espesor del émbolo (no representada en el grabado), que se abre de abajo para arriba, cuyo objeto es suprimir ó establecer la comunicacion entre las dos partes en que el piston divide al cuerpo de bomba ó sea la inferior con la atmósfera. La llave G, que con más detalles se ve en la parte superior de la figura, sirve para interrumpir, á voluntad, el tubo EF, y para poner el recipiente D en comunicacion con el exterior.

El juego de este aparato es el siguiente: suponiendo al émbolo en la parte inferior del cuerpo de bomba, su válvula y la I estarán cerradas: elevándolo, arrastrará consigo la varilla KI hasta que el tope K lo impida; pero la abertura I quedará abierta, y el gas que llena á EF y á D se precipitará en virtud de su expansibilidad á ocupar el vacío producido debajo de B: bajándolo, la válvula I se

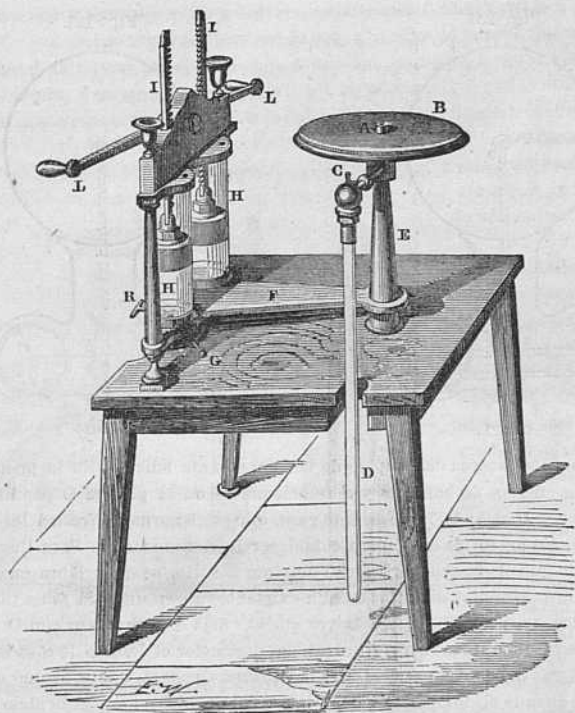
Fig. 124.



cierra y el gas comprimido llegará á adquirir, segun la ley de Mariotte, fuerza elástica suficiente para levantar la válvula alojada en el mismo piston, y escapar á la atmósfera. Repetida varias veces esta manipulacion, merced á la cual hemos expulsado de la campana D cierta cantidad de gas, llegaremos á un enrarecimiento notable; pero nunca al vacío completo, como se comprende fácilmente.

B—La anterior máquina sólo extrae gas cuando el piston sube; mas con objeto de acelerar la operacion, háse adoptado el empleo de dos cuerpos de bomba (fig. 125) dispuestos de manera que cuando un émbolo sube el otro baja; al efecto

Fig. 125.



los vástagos I é I son dentados y engranan en una rueda tambien dentada movida alternativamente en un sentido y en el contrario por la palanca LL. Los dos cuerpos de bomba H y H comunican con el tubo FE que viene á la platina. Esta disposicion hace además ménos penosa la manipulacion de la máquina neumática.

C-a—Se llama *espacio perjudicial* al pequeño hueco que queda entre la base inferior del émbolo y la del cuerpo de bomba; pues no es posible construir con tal perfeccion que al bajar aquel venga á tocar á ésta.

El espacio perjudicial pone un limite al agotamiento del aire ó gas por medio de la máquina neumática, porque cuando el émbolo descendente llega al término

de su carrera sin que la válvula del mismo se abra en razón á que el fluido reducido al volúmen de dicho espacio perjudicial no adquiera, por su enrarecimiento, la suficiente fuerza elástica, el aparato empezará á funcionar sin producir efecto, y el gas no hará otra cosa que extenderse y reducirse de volúmen alternativamente pero sin salir al exterior.

b—Babinet ha alejado el momento en que el espacio perjudicial esteriliza la máquina neumática, por medio de una llave R (fig. 125) situada en la comunicacion de los cuerpos de bomba con el conducto que va á la platina.

Las figuras 126 y 127, que representan la planta de una máquina neumática con la llave de Babinet R en dos posiciones distintas, economizan explicaciones

Fig. 126.

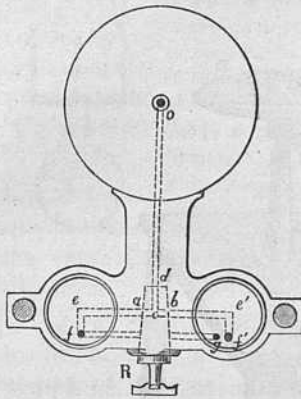
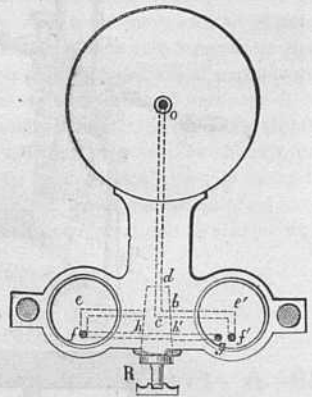


Fig. 127.



siempre confusas acerca del empleo de tan importante adición. En la primera se ve á los dos cuerpos de bomba *e* y *e'* relacionados con la platina *O* por los conductos *f e a* y *f' e' b*: la llave en este caso, que es el normal, ofrece á los tubos *ea*, *e'b* y *od*, dos en forma de T para establecer la comunicacion. Pero llegado el momento en que el espacio perjudicial empieza á serlo, se da á *R* un cuarto de vuelta, y otros agujeros distintos en ella existentes abren una vía *h h' g* (fig. 127) entre los dos cuerpos de bomba, á la vez que el *e* deja de comunicar con *O*. Cuya disposicion produce el resultado siguiente: al descender el émbolo de *e'* se levanta el de *e* y el gas del espacio perjudicial del primero pasará á este último cuerpo de bomba: cuando el émbolo de *e* baja, la válvula cónica cierra el orificio *f* y el de *e'*, que se eleva, puede absorber una nueva cantidad del fluido del recipiente; al descender nuevamente el piston de *e'*, el gas de su espacio perjudicial será extraido por *e*, y así se irá acumulando en este cuerpo el fluido hasta que llegue el momento en que reducido al espacio perjudicial del mismo adquiera tension bastante para levantar la válvula del piston y escapar á la atmósfera.

c—El Sr. Escriche ha resuelto el mismo problema que Babinet, aunque con más perfeccion y hasta un límite teóricamente indefinido, por medio de su *máquina neumática de compartimentos*, cuya construccion y existencia en los gabinetes de Física españoles debiera procurarse.

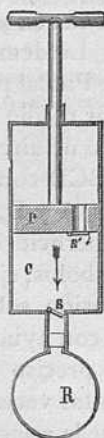
D—Existen otras muchas máquinas neumáticas más ó ménos ingeniosas y

de utilidad mayor ó menor cuyas descripciones no son oportunas, á nuestro juicio, en las cátedras á que el presente libro está dedicado.

148—La *máquina contra-neumática ó de compresion* tiene por objeto introducir una gran cantidad de aire ó de cualquier otro gas en un recipiente de volúmen invariable; realiza, pues, una operacion inversa de la que efectúa la máquina neumática.

La fig. 128 representa uno de estos aparatos, reducido á su más sencilla expresion: se compone de un cuerpo de bomba C provisto de un émbolo P con su correspondiente mango, cada una de cuyas piezas tiene una válvula s y s', que se abre hácia lo inferior del instrumento. El mecanismo de la inyeccion del aire, por ejemplo, en una vasija R es el siguiente: al subir el pistón la válvula s' se abre y entra gas al cilindro C; al descender P, se cierra s' y se abre la válvula s que en adelante queda sostenida por la presion del fluido introducido en R. A medida que la máquina funciona será necesario, como se comprende, emplear esfuerzos más considerables para continuar la operacion. Cuando es necesario producir compresiones extraordinarias, se disponen dos, cuatro, seis ó más cuerpos de bomba cuyos émbolos reciben movimiento de un eje comun provisto de un volante en uno de cuyos radios se fija una manivela.

Fig. 128.

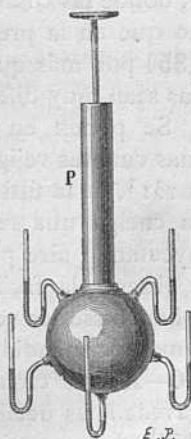


§ II.— PRINCIPIO DE PASCAL.

149—**A**—El teorema formulado en el número **109-A**, á propósito de los líquidos, es perfectamente aplicable á los gases; reconoceremos pues en estos *la propiedad de transmitir con igualdad en todos sentidos, y de sufrirla en todos sus puntos, cualquier presion ejercida sobre una parte de su superficie ó del interior de su masa*. Y hasta el aparato, fig. 129, que se emplea para demostrar este segundo caso del principio de Pascal es casi idéntico al entónces (fig. 71) usado.

El actual consiste en una esfera á la que se adaptan en distintos puntos tubos encorvados de vidrio llenos en parte de mercurio; un cilindro P provisto de émbolo va, tambien, aplicado á dicho depósito; y comprimiendo con él al aire interior, veremos al mercurio desnivelarse igualmente en todos los tubos.

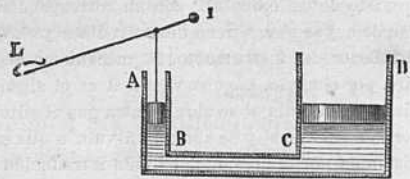
Fig. 129.



B—Como consecuencia, en los gases, lo mismo que en los líquidos (**109-C**), *las superficies que puedan considerarse en el interior de una masa ó en las paredes de la vasija experimentarán presiones proporcionales á sus áreas.*

La demostración práctica de esta otra forma del enunciado de Pascal puede hacerse por medio de un depósito de aire, figura 130, ABCD con dos aberturas, A y D, de diferente superficie cerradas por émbolos; ejerciendo una presión sobre el menor A con ayuda de la palanca IL, para impedir la subida del D es preciso aplicarle una fuerza tantas veces mayor cuanto indique la relación entre las áreas de las caras inferiores de los dos pistones.

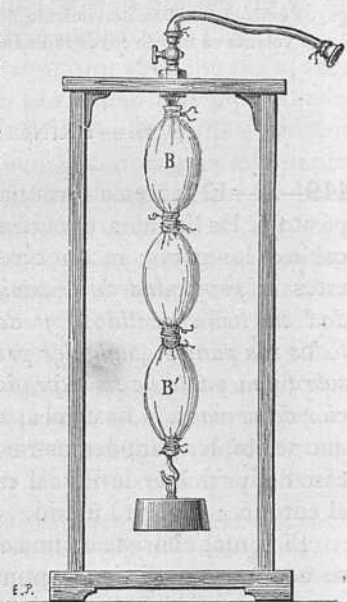
Fig. 130.



Como el ajuste de los émbolos dificulta algun tanto el éxito completo de este experimento, suele sustituirse por el siguiente, donde las cosas pasan lo mismo que en la prensa hidráulica (**135**) por más que las apariencias sean muy diferentes.

Se ponen en comunicacion unas cuantas vejigas B, B' (figura 131), de la última de las cuales cuelga una regular pesa; é inyectando aire por la primera, se observa la facilidad con que, al henchirse las vejigas, se eleva la masa suspendida.

Fig. 131.



150—A—La circunstancia de estar sometidos los gases á la gravedad, es decir *de pesar*, determina, en cuanto la expansibilidad lo permite, algunos fenómenos análogos á los estudiados en el número **110**.

Este hecho de que los gases son pesados, tan difícil de demostrar antes de la invención de la máquina neumática, se comprueba hoy de la manera más sencilla: basta, en efecto, pesar un globo de vidrio (fig. 132) provisto de una armadura metálica con llave; extraer el aire del mismo, y volverlo á pesar, para que no quede duda alguna acerca de que los gases obedecen á la atracción del planeta lo mismo que los cuerpos sólidos y líquidos.

B—A propósito de los fenómenos de los gases cuya exposición constituye el objeto del presente párrafo, hace al caso consignar la comodidad grande que resulta de comprobarlos en el aire; pero observando, á la vez, que nos colocamos en condiciones diferentes de las en que hemos estudiado el mismo asunto en los líquidos. Allí operábamos, en efecto, con pequeñas masas de agua y suponíamos uniforme la densidad de ésta en la vasija; mientras que la atmósfera es un depósito gaseoso de 300 kilómetros de altura donde la gravedad y la expansibilidad determinan una variación continua, ó de capa en capa, de la densidad del fluido según una ley compleja.

C—De las ocho consecuencias del principio de Pascal que comprobamos en los líquidos, solo dos, la 2.^a y la 6.^a, se realizan idénticamente en los gases.

1.^a *En cada capa horizontal de un gas la presión es uniforme.*

La existencia de presiones en todos sentidos en una misma capa de aire queda evidenciada por los siguientes experimentos: se coloca (fig. 133) sobre la platina de la máquina neumática un vaso de cristal abierto inferiormente y cerrado por arriba con un pedazo de membrana bien tenso; se extrae el aire del aparatito así constituido, llamado *rompe-vejigas*, y veremos la membrana hacerse cóncava y romperse al fin con estrépito en virtud de la presión de arriba para abajo no equilibrada. Dando una forma adecuada al vaso de cristal la membrana se rasga de igual modo por la presión de abajo arriba ó por una lateral.

Fig. 132.



Fig. 133.



Hasta qué punto, y á pesar de la tenuidad del aire, son importantes estas presiones que el peso del mismo desarrolla en el seno de la atmósfera, se pone de relieve con los *hemisferios de Magdeburgo* (fig. 134), aparato compuesto de dos medias esferas huecas de 12 ó 15 centímetros de diámetro al ménos, cuyos bordes están forrados con un anillo de cuero bien ensebado; una de ellas tiene un asa, y la otra un conducto de llave que se puede atornillar á la máquina neumática. Reuniendo los hemisferios es fácil separarlos antes de hacer el vacío, mas una vez éste practicado son necesarios para ello grandes esfuerzos.

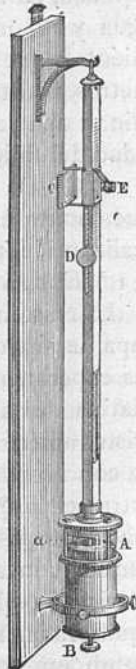
Fig. 134.



Para medir el valor de esta presion y comprobar su igualdad en cada capa de la atmósfera se emplea el aparato llamado *barómetro* (fig. 135), acerca de cuya construccion daremos algunos detalles en razon á su excepcional importancia.

Fig. 135.

El modelo de Fortin, que es uno de los más extendidos, se compone de un tubo de vidrio de 80 á 90 centímetros de longitud, y 1 ó algo más ó ménos de diámetro, cerrado por un extremo y adelgazado y abierto por el otro; tubo que préviamente ha sido lavado varias veces con agua, alcohol, éter, ácido nítrico, etc., y secado, hasta dejarlo perfectamente limpio y desprovisto de humedad. Por la extremidad abierta se le sumerge en una cubeta ó depósito cilíndrico de cristal A, armado en laton, de unos 10 ó 12 centímetros de longitud y 4 á 6 de diámetro, cuyo fondo es un trozo de piel flexible de gamuza sólidamente adherido á las paredes interiores de A y que descansa sobre un tornillo B, con ayuda del cual se le puede á voluntad subir ó bajar dentro de ciertos límites. Una punta de marfil α , fija en la tapa superior de la cubeta, es tambien parte importante del instrumento.



El largo tubo barométrico debe llenarse de mercurio con todas las precauciones posibles á fin de que no quede la menor burbuja de aire aprisionada entre sus paredes y el líquido metálico; á cuyo efecto se verifica la operacion en tres veces, echando en cada una 25 ó 30 centímetros de mercurio y haciéndola hervir gradualmente antes de añadir la otra. Practicado lo cual con perfeccion absoluta, se tapa con el dedo la extremidad abierta del tubo y se le introduce en la cubeta, donde préviamente se ha puesto tambien mercurio, destapándolo en el seno en éste; con lo cual la columna metálica desciende en parte, quedando sostenida una porcion cuya altura es 0,76^m, cuando se trabaja al nivel del mar y á la temperatura de 0°, y menor si en parajes más elevados; y sobrando un resto de tubo vacío en la parte superior, que se llama *cámara barométrica ó vacío de Torricelli* en honor, esto último, del primer inventor del aparato.

Como la presion atmosférica y la de la columna barométrica se ejercen de arriba para abajo sobre la superficie del mercurio en la cubeta, desde el momento en que se equilibran son evidentemente iguales y la segunda mide á la primera. Tal es el origen de la unidad de presion que venimos usando bajo el nombre de *atmósfera*.

La teoría del barómetro es un caso particular de la de fluidos en depósitos comunicantes; y el experimento de la figura 83 (pág. 143) lo patentiza mostrándonos la elevacion, dentro de un tubo vacío de agua, de una columna de mercurio bajo la presion del agua que obra sobre el mismo metal líquido en el vaso exterior ó especie de cubeta; al modo que actualmente en un tubo vacío de aire se eleva el azogue por el peso del aire sobre la superficie del metal en la cubeta. La única diferencia estriba en que los fluidos son uno líquido y otro gaseoso en el caso del barómetro.

Segun esto, construyendo un barómetro con otros líquidos diferentes del mercurio las columnas correspondientes estarian en razon inversa de las densidades de los mismos; consecuencia que la experimentacion comprueba plenamente.

Como la presion de los líquidos sobre el fondo del vaso, ó sobre otra capa horizontal de extension determinada, varía proporcionalmente á la distancia al nivel, é independiente-

mente de la cantidad del líquido, podremos apreciar perfectamente la presión del aire por la altura de la columna barométrica contada desde la superficie del mercurio en la cubeta. Al efecto el barómetro lleva una escala cuyo cero empieza en la punta de la espiguilla de marfil α , y antes de hacer observación alguna con el aparato se sube ó baja el fondo de la cubeta por medio del tornillo B hasta que la superficie del mercurio toque al vértice de α .

Trasformado el problema de medir presiones en el de medir alturas de columnas de mercurio hace al caso observar que en esta última operación será preciso tener en cuenta la depresión capilar que dicho metal sufre en el tubo barométrico, y sus cambios de densidad con los de temperatura. En los tratados especiales se explica la manera de hacer estas correcciones.

Pesando un centímetro cúbico de mercurio 13,6 gramos, la presión de atmósfera sobre un centímetro cuadrado de una capa de aire situada al nivel del mar valdrá á 0° $13.6 \times 76 = 1033$ gramos, ó sea 1 kilogramo y 33 gramos; según cuyo cálculo la presión que soporta un hombre, suponiendo igual á metro y medio cuadrado la superficie de su cuerpo, es de unos 15.500 kilogramos. Estos números explican satisfactoriamente lo que sucede en los hemisferios de Magdeburgo.

Para demostrar que en cada capa horizontal la presión es uniforme, basta pasear el barómetro por un paraje cualquiera de modo que la superficie del mercurio de la cubeta no salga de su plano, y ver que la altura de la columna barométrica permanece invariable; como también se prueba que en el seno de una masa gaseosa dicha presión cambia con la profundidad, con solo colocar el instrumento en diferentes parajes (por ejemplo al pié de una torre y en su parte superior) y observar que la columna de mercurio disminuye de altura cuando el aparato se eleva, y vice versa.

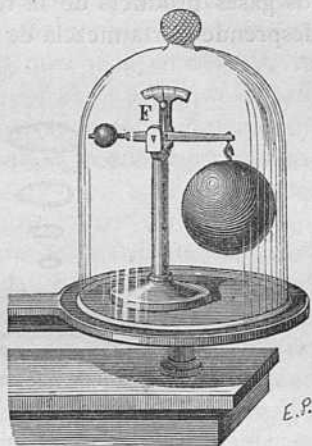
Lo que no sucede en la atmósfera, por lo que dejamos indicado acerca de la variación de la densidad en su seno, es que la presión en cada capa sea igual al peso de una columna de aire que tenga por base dicha superficie y por altura la distancia desde la misma al límite superior del océano atmosférico, como tampoco esto es exacto cuando se trata de un depósito

líquido de grandes profundidades (el mar); pero se comprende que en una pequeña masa gaseosa, ó de densidad uniforme, se verificará de igual modo que en los líquidos.

2.^a *Todo cuerpo sumergido en un gas pierde de su peso tanto como pesa el volúmen de fluido desalojado:* que es el principio de Arquímedes.

Se patentiza experimentalmente la pérdida de peso, sin medirla, con el *dasímetro* ó *baróscopo* (figura 136), especie de balancita cuyos platillos están sustituidos por una pequeña esfera maciza y otra hueca de gran volúmen que se equilibran: colocado este aparato debajo de una campana en la platina de la máquina neumática y enrareciendo el aire de dicho recipiente, la palanca sale de la posición horizontal, cayendo del lado de la esfera voluminosa cual si hubiera aumentado de peso; demostrando con ello que su peso real es mayor y que si no lo parece en el aire es por la más importante pérdida que sufre en relación con la que experimenta la esfera menor.

Fig. 136.



§ III. — COHESION DE LOS GASES.

151—A—Si quiera la cohesión intervenga de una manera mínima en el mecanismo ó constitución de los gases ordinarios, su existencia en las moléculas de éstos parece suficientemente comprobada, por más que las manifestaciones de la misma (los indicios pudiéramos decir) ofrezcan el pequeño desarrollo consiguiente á la magnitud de las distancias moleculares.

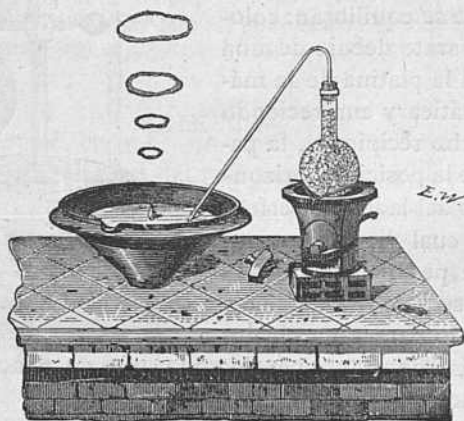
B—Hé aquí varios fenómenos en los cuales la cohesión parece jugar un papel bastante marcado.

1.^o Acabamos de ver (**144—A**) que todos los gases, excepto el hidrógeno, se comprimen más de lo indicado por la ley de

Mariotte; y hemos atribuido tal discordancia á un efecto de cohesion que se suma con el de la compresion. Esta hipótesis se halla justificada por el hecho de que la compresibilidad de los gases aumenta de un modo extraordinario cuando se encuentran próximos á pasar al estado líquido, es decir cuando las distancias moleculares son mucho más pequeñas.

2.º Calentando en un pequeño matraz de vidrio (fig. 137) una mezcla de fósforo y cal apagada y húmeda, y dirigiendo los gases producto de la reaccion á una vasija con agua, se desprende cierta mezcla de fosfuros de hidrógeno espontánea-

Fig. 137.



mente inflamable, que al arder origina bellas aureolas blancas de ácido fosfórico: estos anillos, ó *coronas de Gengembre*, al elevarse en el aire van aumentando gradualmente de diámetro hasta que se disipan; y el profesor Escriche ha demostrado que tan curioso fenómeno no es peculiar del fosforo de hidrógeno, sino comun á todos los gases al ser lanzados en ciertas condiciones dentro de la masa de otros, como se comprueba sin dificultad haciéndolos visibles por medio del humo de tabaco, al modo que el ácido fosfórico permite observar los anillos formados por los productos gaseosos de la combustion de los fosfuros de hidrógeno.

Sin negar la intervencion simultánea de otras fuerzas en la produccion de las coronas gaseosas, como en la de los anillos

líquidos (**115-C**), también es cierto que no se puede prescindir de la cohesión al intentar explicarlos.

* 3.^a Sondhaus, haciendo visibles las venas gaseosas, también con auxilio del humo de tabaco, ha obtenido por el choque de las mismas contra un disco, superficies planas, cóncavas y convexas análogas á las que Savart (**115-D**) observó trabajando con líquidos: dos venas opuestas le han dado, como á este último físico (fig. 93), una hoja ó superficie que tomaba cierta forma oblicua separando un poco de la dirección común á cualquiera de las venas gaseosas.

4.^a El chorro ó vena gaseosa experimenta al salir por un orificio practicado en pared delgada el fenómeno de la contracción ó reducción de su sección en una tercera parte, exactamente lo mismo que los líquidos; y ya sabemos (**131-A**) que tal anomalía es producida exclusivamente por la cohesión de las moléculas.

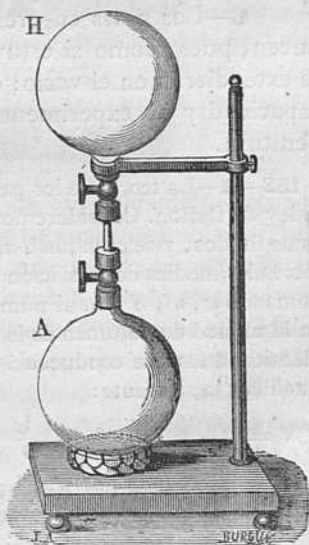
§ IV.—DIFUSION.

152—A—A Berthollet se debe el experimento siguiente: puso en comunicación dos globos de vidrio, el inferior lleno de ácido carbónico y el superior de hidrógeno, y los instaló en una cueva al abrigo de las trepidaciones y de los cambios de temperatura; y al cabo de algunas horas ambas capacidades contenían una mezcla uniforme de los gases, á pesar de que el ácido carbónico es 22 veces más pesado que el hidrógeno.

Tal es el fenómeno de la difusión ó mezcla espontánea de los gases, análogo, como se ve, al (**122**) de la difusión de los líquidos.

B—Berthollet observó que la presión no había cambiado en el interior de los globos durante el experimento anterior, y Dalton ha formulado la siguiente

Fig. 138.



ley: en una mezcla de muchos gases la presión de cada uno de ellos es la misma que si estuviera solo.

La demostración experimental de este enunciado se practica sumergiendo en una cubeta con mercurio varios tubos T barométricos con sus columnas del mismo metal (fig. 139), é introduciendo en cada uno de ellos cierta cantidad de un gas distinto. Sean v, v', v'', \dots los volúmenes y p, p', p'', \dots las presiones respectivas; y, trasvasando todos los gases á un solo tubo, llamemos V y P, al volúmen y á la presión de la mezcla: en virtud de la difusión las presiones de los diferentes gases mezclados estarán representadas por

$$p \frac{v}{V}, p' \frac{v'}{V}, p'' \frac{v''}{V} \dots$$

y si la ley de Dalton se verifica, P debe ser igual á la suma de estas cantidades: que es precisamente lo que se verifica.

C—Los gases en presencia se conducen, pues, como si estuvieran solos y se extendieran en el vacío; es decir, acaban por llenar toda la capacidad y no experimentan al realizarlo variación de temperatura.

* **153—A**—La teoría de los gases (**142**) da perfectamente cuenta de la ley de Dalton. Consideremos, en efecto, una mezcla de varios de estos fluidos, y sean m', m'', m''', \dots las masas y v', v'', v''', \dots las velocidades medias de traslación de las moléculas de cada uno de ellos; llamando n', n'', n''', \dots al número de moléculas diferentes contenidas en la unidad de volúmen de la mezcla, por consideraciones analíticas idénticas á las que conducen á la fórmula del número **143—B—a**, se establece la siguiente:

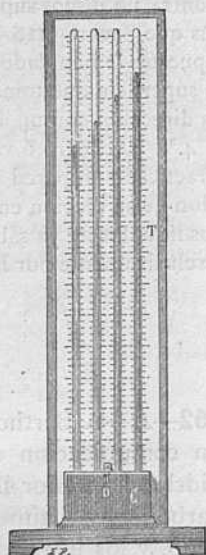
$$P V = \frac{1}{3} n' m' v'^2 + \frac{1}{3} n'' m'' v''^2 + \frac{1}{3} n''' m''' v'''^2 + \dots;$$

ó bien, designando por p', p'', p''', \dots las presiones de cada gas, en el supuesto de que ocupe el volúmen total V,

$$P V = p' V + p'' V + p''' V + \dots$$

que es la ley de Dalton.

Fig. 139.



B—Sabemos que la fuerza viva media $\frac{1}{2} m v^2$ de una molécula de un gas es proporcional (**142-B-b**) á la temperatura; y como durante la difusion no se observa variacion alguna de calor, resulta que las velocidades de traslacion v', v'', v''' no deben modificarse por el hecho de la mezcla. Por otra parte las colisiones tienden indudablemente á igualar las fuerzas vivas moleculares individuales en una mezcla gaseosa, es decir á que

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m' v'^2 = \frac{1}{2} m'' v''^2 = \dots$$

ó bien $m v^2 = m' v'^2 = m'' v''^2 = \dots$ (1)

y como, llamando n, n', n'' al número de moléculas de cada gas contenidas en igual volúmen á la misma presion,

$$P V = \frac{1}{3} n m v^2 = \frac{1}{3} n' m' v'^2 = \frac{1}{3} n'' m'' v''^2 = \dots,$$

tendremos

$$\frac{1}{3} n m v^2 = \frac{1}{3} n' m' v'^2 = \frac{1}{3} n'' m'' v''^2 = \dots;$$

y por consiguiente $n = n' = n'' = \dots$:

es decir que *en igualdad de circunstancias* (temperatura, volúmen y presion) *los gases tienen el mismo número de moléculas*; consecuencia notable á que se llega tambien como sabemos (**22-A**) por la via experimental.

* **154-A**—La difusion de los gases parece obedecer á la misma ley elemental que la de los líquidos (**122-C**); y de la teoría del fenómeno y de los experimentos de Graham se deduce que *la velocidad con que se verifica la de uno de aquellos fluidos, está en razon inversa de la raíz cuadrada de su densidad*; ó bien que *los tiempos que, en igualdad de circunstancias, tardan en difundirse cantidades iguales de distintos gases están en razon directa de la raíz cuadrada de sus densidades*.

B—Al establecer los coeficientes de difusion se toma por unidad de tiempo el segundo, en lugar del día que adoptamos en el caso de los líquidos.

155—Cuando los gases se hallan separados por una capa de ciertos líquidos, la difusion se verifica, segun los trabajos de Graham y Wroblewski, como si estuvieran directamente en contacto.

156-A—Al través de los *sólidos porosos* el fenómeno solo se realiza sensiblemente de la misma manera que la difusion libre;

explicándose las pequeñas discrepancias observadas entre el cálculo y la experimentación por la acción atractiva de los conductos capilares del diafragma sobre el gas (**14-B-e**).

B—Pero lo más notable es que algunos gases atraviesan ciertos cuerpos sólidos no considerados como porosos; el hidrógeno, por ejemplo, pasa por el platino y por el hierro á la temperatura del rojo; el óxido de carbono se difunde también á través del hierro á temperatura no muy elevada; desde 240° hasta una temperatura próxima al rojo el hidrógeno pasa abundantemente al través de un tubo de paladio donde se mantenga el vacío, etc. Cuyos fenómenos pueden compararse con los de *exósmose* y *endósmose* (**123-B**), y explicarse cómo el paso de los líquidos á través de las membranas, esto es, admitiendo que los gases se disuelven pasajeramente en una de las caras del sólido y son reabsorbidos por la otra, de la cual se desprenden.

§ V.—DISOLUCION DE LOS GASES EN LOS LÍQUIDOS.

157—A—La adhesión entre los gases y los líquidos es un fenómeno de existencia probable pero no comprobada experimentalmente, porque en los casos hasta ahora observados el gas no se presenta ó subsiste adherido á la superficie líquida, sino que se extiende bajo ésta en el seno de su masa, apareciendo el hecho como una especie de difusión del fluido más sutil en el que lo es ménos.

Tal es el fenómeno de la *disolución de los gases*, considerado en el caso en que no haya acción química entre el gas disuelto y el líquido disolvente, y con entera independencia de su aspecto térmico, bajo el cual será objeto de nuestro estudio en otro lugar.

B—Las leyes de la mezcla de gases y líquidos á temperatura constante han sido formuladas por Dalton del modo siguiente:

1.^a *A temperatura constante un líquido disuelve siempre la misma fracción de su volumen, cualquiera que sea la presión exterior final del gas, refiriendo á esta presión el volumen de gas disuelto; ó en otros términos, los pesos de un gas di-*

suelto en la misma cantidad de líquido son proporcionales á la presión.

2.^a Cuando muchos gases se encuentran en presencia de un mismo líquido, cada uno de ellos es absorbido como si estuviera solo: lo que significa que la cantidad disuelta de cada gas es proporcional á su presión particular en la mezcla despues de la absorcion.

C—Se llama *coeficiente de disolucion ó de absorcion* á la razón constante á toda presión entre la densidad del gas disuelto y la del que se encuentra sobre el líquido despues de la absorcion: el valor de este coeficiente disminuye rápidamente cuando la temperatura aumenta.

La constancia del coeficiente exige que cuando un líquido que tenga disuelto un gas esté en contacto con un ambiente en que no exista éste último, parte del mismo se desprenda del líquido hasta que las densidades del gas libre y disuelto sean las debidas.

D—Cuando un gas es muy soluble, de manera que la porcion del mismo absorbida no representa una fracción muy pequeña del peso del disolvente, las leyes de Dalton dejan de verificarse y el fenómeno reviste verosímilmente los caracteres de un cambio del estado gaseoso al líquido.

E—Merece llamar la atención el hecho de que cualquier gas no es absorbido por todos los líquidos; ni lo es igualmente por sus disolventes; ni ninguno de estos lo es de todos los gases; sino que aparentemente hay algo de *electivo* en estas acciones, como á primera vista parece suceder en las capilares que se verifican entre líquidos y sólidos.

* 158—A Graham se debe el siguiente experimento fundado en la desigual solubilidad del aire y del ácido carbónico en el agua, que exhibe el mecanismo de la difusión gaseosa á través de los líquidos (155), y parece confirmar la explicación dada á los fenómenos de exósmose y endósmose (123-B-a), y al paso del hidrógeno etc., por algunos metales (156-B). Colocando en la cuba de mercurio una vejiga húmeda, cerrada y que contenia cierta cantidad de aire, debajo de una campana llena de ácido carbónico, la vió poco á poco henchirse hasta que estalló. El hecho se explica del modo siguiente: el ácido carbónico se disuelve en el agua que impregna las paredes de la vejiga y así llega á la superficie interior de la misma de donde se desprende al encontrarse con una atmósfera de aire; y como en virtud

de esto el agua puede disolver nueva cantidad de ácido carbónico, que por idéntico mecanismo entrará en la vejiga, quedará establecida una corriente endosmótica mientras el ácido carbónico no alcanza dentro la misma densidad que fuera. Simultáneamente se verifica igual fenómeno con el aire interior, que, por lo tanto origina otra corriente de dentro á fuera; solo que como el coeficiente de absorcion del aire por el agua es menor que el del ácido carbónico, la endósmose es mayor y la vejiga se hincha y se rompe finalmente.

Beclard ha inventado un pequeño aparato para realizar cómoda y fácilmente el experimento anterior.

§ VI. — OCLUSION DE LOS GASES.

159—A—La adhesion entre los gases y los sólidos es un fenómeno muy conocido; ya dijimos (**14-B-e**) la manera de hacer visible la capa de aire adherida á una lámina de oro; pero además pueden citarse multitud de otros casos y experimentos. En las máquinas neumáticas, despues de haber practicado el vacío á un milímetro, la presión aumenta durante algunas horas á causa de que se va desprendiendo el aire adherido á las superficies interiores. Al llenar un globo de vidrio con ácido carbónico una porcion notable de éste es condensada. El hierro absorbe en caliente de cuatro á siete veces su volúmen de óxido de carbono y despues lo retiene al enfriarse. El gas más absorbible por la plata es el oxígeno. El platino condensa al aire sobre su superficie de una manera más pronunciada que el cristal; y á este género de acciones debe tambien referirse la fuerte adherencia de la humedad atmosférica sobre el vidrio. Añadamos, por último, que recientemente se ha demostrado la existencia de gases en la masa de muchos metales, no bajo la forma de burbujas aprisionadas, sino como si estuvieran disueltos, ampliando el fenómeno ya conocido de que á temperaturas elevadas ciertas sustancias metálicas absorben grandes cantidades de determinados gases.

B—Pero donde se observan en más grande escala los fenómenos de *oclusion*, retencion ó absorcion de los gases, es en los cuerpos porosos, á causa, probablemente, de sus enormes superficies interiores: el carbon, por ejemplo, puede retener 90 veces su volúmen aparente de gas amoniaco, y 65 de

ácido sulfuroso: la esponja de platino absorbe hasta 600 ó 700 veces su volúmen de gas amoniaco; y las hojas metálicas hechas trozos y despues convertidas en masa, y el vidrio y la porcelana en polvo, etc., presentan análogos fenómenos.

160—A—Mientras estos hechos no pasan de la adhesion del gas á la superficie del sólido, pueden ser comparados á los capilares; y Magnus ha propuesto llamar *atraccion electiva* á la fuerza, dependiente de la naturaleza del fluido y de la del cuerpo, que produce la condensacion. Este mismo físico ha logrado medir por experimentos delicados el gas adherido en algunos casos: así, cada milímetro cuadrado de vidrio á 0° retiene 0,0008 de milímetro cúbico de ácido sulfuroso.

B—Pero cuando las cantidades de gas son absorbidas por el sólido, y más si lo son en proporciones muy considerables, el fenómeno se complica: en algunos de los ejemplos antes citados pueden verse hechos de difusion de los gases en los sólidos análogos de los de disolucion en los líquidos que acabamos de estudiar; y en otros no es posible concebir que el fluido subsista en su estado, y se admite que puede liquidarse: en tales casos se observa además un desprendimiento de calor tan notable como lo indica el hecho de ponerse incandescente el platino cuando absorbe hidrógeno.

Segun Henry *la absorcion de un gas por un sólido poroso es proporcional á la presion.*

§ VII.—VENA Y CORRIENTES GASEOSAS.

1.º—Constitucion de la vena.

161—A—Si suponemos un depósito lleno de gas cuya presion ó densidad sean superiores á las del aire, abriendo un orificio en una pared delgada del mismo se lanza por él un *chorro ó vena gaseosa*, al modo que sucede en los líquidos.

Experimentalmente puede demostrarse este hecho con gran facilidad: en una vasija que contenga ácido carbónico hagamos un agujero en el fondo, y colocando otra capacidad inmediatamente debajo, la caída del gas se evidencia sin más que introducir, y ver que se apaga, en este segundo vaso un cuerpo

en ignicion. En un depósito cerrado, introduzcamos gas cloro á una presión superior á la de la atmósfera, y estableciendo una comunicacion con el aire observaremos el chorro de color amarillo verdoso propio de dicho gas.

B—La vena gaseosa presenta numerosas analogías con la vena líquida. Savart, haciéndola visible con polvo de lycopodio, ha notado *su contraccion* á poca distancia de la abertura de salida: D'Aubuisson ha deducido de numerosos experimentos que la *seccion contraida* es próximamente dos tercios (0,65) de la del orificio; y el físico español Sr. Escriche lanzando en la oscuridad chorros gaseosos á través de una masa de agua, y alumbrándolos con una luz viva de intermitencias rápidas, ha observado en los mismos la existencia de porciones abultadas separadas por otras más estrechas, formadas por esferas gaseosas de cierto diámetro entre las cuales alternan unas muy pequeñas; las burbujas gruesas se presentan además agitadas por un movimiento vibratorio pronunciado de contraccion y dilatacion en sentido vertical. Finalmente, cierto sonido que se percibe en las inmediaciones de la vena gaseosa completa el cuadro de las analogías con la líquida (**130-B**).

* **C**—Excusamos intentar la explicacion de los anteriores fenómenos en vista de su identidad con los estudiados en el número **130**.

2.º Leyes de las corrientes gaseosas.

162—A—Bernonilli supuso que los gases obedecen en su salida por orificios practicados en pared delgada al principio de Torricelli, es decir que *la velocidad con que se lanzan las moléculas es igual á la que adquiririan cayendo en el vacío desde la parte superior del depósito gaseoso al orificio de salida*.

Experimentos delicados llevados á cabo por distintos físicos han demostrado, que si la hipótesis anterior es casi verdadera mientras la diferencia de presiones entre el interior y el exterior del depósito es muy pequeña, desde que excede de 8 centímetros de mercurio no se verifica ni aun aproximadamente. La causa de ello es la expansibilidad, sin género alguno de duda.

Debe advertirse que como la salida de un gas lleva consigo la disminucion de la densidad del mismo en el depósito, la velocidad no puede ser medida por el peso del fluido salido,

sino por su volúmen; en consonancia con lo cual se define la *velocidad* diciendo que *es el espacio recorrido durante un segundo por una molécula de gas, suponiendo que conserva durante este tiempo el movimiento que posee en el instante de abandonar el orificio.*

* **B-a**—La dilatacion de los gases, simultánea con su salida de un depósito, va acompañada de un enfriamiento de la masa que complica extraordinariamente el fenómeno; sin embargo, hecha abstraccion de tal descenso de temperatura, y admitiendo que la ley de Torricelli se verifica, se llega á una consecuencia perfectamente comprobada por la experimentacion, á saber: *que la velocidad de salida de diferentes gases por orificios practicados en pared delgada está en razon inversa de la raíz cuadrada de la densidad de los mismos.*

Sabemos, en efecto, que la velocidad de salida, segun el principio de Torricelli está representada por la fórmula (**132-A**).

$$v = \sqrt{2 g c} \quad (1)$$

siendo c la altura del fluido en el depósito. Suponiendo uniforme la densidad d respecto del agua de una columna gaseosa cuya altura es c , y que el peso de la misma equilibra á otra atmosférica de altura h expresada en centímetros de mercurio, siendo D la densidad de este cuerpo, tendremos

$$c d = h D; \quad y \quad c = \frac{h D}{d}$$

valor que llevado á la ecuacion (1) la trasforma en

$$v = \sqrt{\frac{2 g h D}{d}}$$

que consigna la ley.

Sustituyendo por d los números respectivos en el caso del aire ($d = 0,00129$) ó en el del hidrógeno, y tomando el metro como unidad de longitud, resultan para v los valores 396, en el uno y 1500 en el otro; cifras que representan la velocidad de salida al vacío permaneciendo la masa gaseosa constantemente á 0° á un lado y otro del orificio.

La presente ley, y la de la difusion (**154-A**), son trasuntos de la (**142-B-c**) de las velocidades moleculares; como los números anteriores lo son de los (**142-B-c**) representantes de dichas velocidades.

b—Bunsen ha comprobado experimentalmente la ley ante-

rior determinando el tiempo necesario para que un volúmen fijo de diferentes gases salga en condiciones idénticas, toda vez que tales tiempos deben ser proporcionales á las raíces cuadradas de las densidades.

El aparato empleado por dicho físico se compone (figura 140) de una campana de vidrio *aa*, alargada y provista superiormente de una llave que permite ó no, á voluntad, la comunicacion con el exterior por medio de un tubito terminal de agujero finísimo practicado en platino. A cierta altura lleva marcada una raya circular *y*, y en su interior se aloja un flotador, tambien de cristal, *bb*, con dos señales á distinta altura *b'* y *b''*.

Para hacer un experimento se llena de gas la campana, se la sumerge en una cuba de mercurio *gg* hasta el nivel *y*, se abre la llave superior, y como el metal líquido va entrando por abajo y el fluido saliendo por arriba, falta solo anotar el tiempo que transcurre entre los pasos de las señales *b'* y *b''* por la raya circular *y*. Si la ley es exacta, la razon de los cuadrados de las duraciones de salida de un gas y del aire debe representar la densidad del gas, lo cual, efectivamente, sucede.

c—Thomson ha deducido de esta ley que *el producto de la masa de gas salida por la velocidad con que el mismo se precipitaria en el vacío es constante para todos los gases*. En efecto,

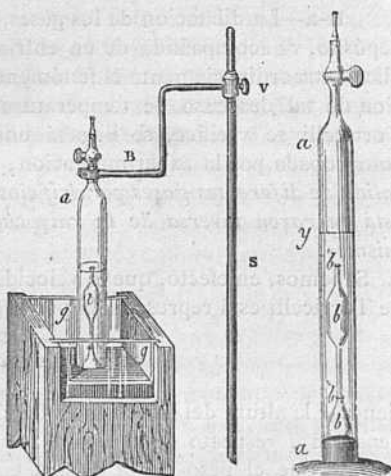
$$\frac{v^2}{v'^2} = \frac{d'}{d} \quad \text{y} \quad \frac{v'}{v} = \frac{V'}{V}$$

llamando *V* y *V'* á los volúmenes de los dos gases salidos en igual tiempo y *v* y *v'* á las velocidades. Multiplicando ambas proporciones tendremos

$$\frac{v}{v'} = \frac{V' d'}{V d} \quad \text{ó bien} \quad \frac{v}{v'} = \frac{m'}{m} \quad \text{ó bien} \quad v m = v' m'$$

* 163—A—Cuando el orificio de salida no está practicado en pared delgada, ó si se adapta al mismo un tubo adicional cuya longitud no exceda de siete ú ocho veces su diámetro, el efecto de la contraccion

Fig. 140.

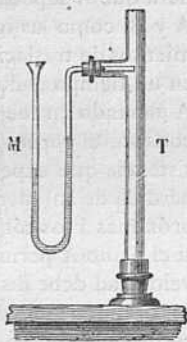


de la vena gaseosa disminuye como en los líquidos, según D'Aubuisson, y el gasto práctico se eleva desde las dos terceras partes á 0.93 del teórico cuando el tubo es cilíndrico, y á algo más si ligeramente cónico.

B-a—También ha estudiado D'Aubuisson el movimiento de los gases cuando al orificio de salida se unen largos conductos, y encontrado que la velocidad disminuye notablemente, y que es menor cerca de las paredes que en el eje del tubo. Como resultado de sus experimentos ha formulado la siguiente regla: *la resistencia que produce la disminucion de la velocidad es proporcional á la longitud del conducto, y al cuadrado de la velocidad; y está en razon inversa del diámetro.*

b—La presión que los gases ejercen sobre las paredes de los tubos es menor cuando corren que si están en equilibrio, y disminuye á medida que la velocidad aumenta; pudiendo llegar no solo al valor cero sino á convertirse en una especie de succión hácia adentro. La demostración experimental de estos hechos, comunes á líquidos (**133-B-b**) y gases, se realiza actualmente enchufando lateralmente en un conducto T (fig. 141), por donde corre un gas con velocidad variable á voluntad ó deja de correr, un tubo manométrico de cristal M de forma de U y con mercurio en ambas ramas. Cuando el fluido no corre y su presión es superior á la de la atmósfera el metal está á más altura en la rama exterior; desde que el gas se mueve el líquido tiende á nivelarse en ambas; y si la velocidad es suficiente gana más altura en la rama interior.

Fig. 141.



C—Adaptando al orificio de salida de un gas un tubo capilar, el paso se retarda extraordinariamente; hasta el punto de que, según los trabajos de Graham, las corrientes siguen las leyes de Poiseuille, cuyo enunciado (**133-C**) puede verse en el caso de los líquidos.

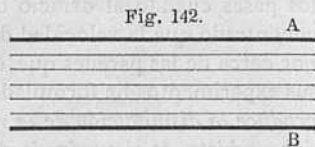
La filtración de los gases, ó sea su paso á través de cuerpos porosos, no se verifica conservando aquellos exactamente sus velocidades; sino que éstas se modifican en cierto modo como en los tubos capilares.

3.º Rozamiento interior de los gases.

* **164-A**—La resistencia que experimentan los gases para moverse en tubos largos, y la circunstancia de verificarse en ellos las leyes de Poiseuille, obligan, como vimos á propósito de los líquidos, á

admitir la adherencia absoluta de una capa de gas á las paredes interiores del conducto, y á atribuir tales fenómenos á un *rozamiento interior de los gases*.

El mecanismo de este rozamiento puede concebirse del modo siguiente: supongamos una capa gaseosa (fig. 142) comprendida entre dos paredes sólidas A y B, planas y paralelas, la una B inmóvil y la otra A moviéndose ó resbalando en su propio plano con una velocidad invariable. Las moléculas gaseosas en contacto y próximas á A participan en



cierto modo del arrastre de ésta; así como las inmediatas á B no son afectadas por el movimiento de A, lo uno y lo otro en virtud de la adherencia entre los gases y los sólidos. La masa comprendida entre A y B se encuentra pues en una especie de equilibrio móvil; de manera que si suponemos un plano intermedio y paralelo á las paredes A y B, como las moléculas del gas están agitadas por rápidos movimientos de traslación en todas direcciones, atravesarán por el mismo en un tiempo dado cierto número de tales particillas, la mitad hácia A ganando en fuerza viva y la otra mitad hácia B perdiendo. En esto consiste el *rozamiento interior ó viscosidad* de los gases, ó sea la resistencia que experimentan unas capas gaseosas (traducida por una pérdida de su fuerza viva) para moverse en contacto de otras (las próximas á los sólidos). Como se comprende, el resultado es el mismo si el plano A permanece inmóvil y el fluido corre; y en los tubos la velocidad debe disminuir cerca de las paredes.

Consecuencia de esta explicación es que los gases ofrecerán cierta resistencia al paso de un cuerpo que los atraviese, á causa del rozamiento del fluido adherido y arrastrado con el resto de la masa.

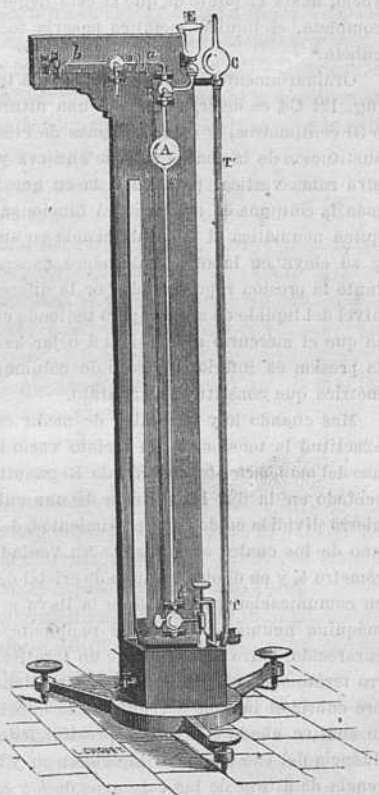
B—Toda vez que los gases obedecen á las leyes de Poiseuille midiendo la cantidad de los mismos que sale en la unidad de tiempo por un tubo capilar, como lo ha hecho Graham, se puede determinar el coeficiente de rozamiento interior por medio de las fórmulas de la página 172. Meyer y Maxwell han empleado además otro procedimiento, lo mismo en los gases que los líquidos, consistente en observar el decrecimiento de la amplitud de las oscilaciones de un disco suspendido de un hilo sin torsión y sumergido en el fluido cuyo coeficiente de rozamiento interior se quiere determinar.

El coeficiente de viscosidad es independiente de la presión ó bien de la densidad del gas; en absoluto, según deducciones teóricas de Maxwell; y solo dentro de ciertos límites, atendiendo á los resultados de la experimentación. Además crece cuando la temperatura se eleva, al revés de lo que sucede en los líquidos.

APLICACIONES.

165—Con las máquinas neumáticas ordinarias escasamente puede hacerse el vacío hasta más allá de medio milímetro, y á fin de atender á la necesidad de producir enrarecimientos considerables se han inventado otras mucho más perfectas cuyo fundamento es la teoría del barómetro. La figura 143 representa uno de estos aparatos construido por Alvergriat. Consiste en un tubo barométrico t' , ensanchado, A, á la altura de la cámara, y provisto, más arriba aún, de una llave de tres vías R, por medio de la cual puede cerrarse á t' , ó ponerlo en comunicación con el embudo de cristal E, ó con el conducto $a b$ que lleva al recipiente donde quiere hacerse el vacío: otras dos llaves, indicadas en el grabado, permiten también interrumpir ó establecer el paso desde el tubo al embudo y al recipiente. La cubeta de t' es móvil, y se compone de un depósito esférico C empalmado con dicho tubo t' por medio de otro de cauchú TT; merced á cuya disposición el globo C puede situarse á la altura que se desee respecto de las demás partes del aparato.

Fig. 143.



El manejo de esta máquina es algo engorroso pero nada difícil: suponiendo á la cubeta C en el suelo y llena de mercurio, hagamos que la llave R y la del embudo permitan la comunicacion de t' con E; elevemos á C á la altura que indica el grabado, con lo cual el mercurio subirá hasta E, por la teoría de los vasos comunicantes; cerremos la llave del embudo, y bajemos hasta el suelo la cubeta C: el resultado será la trasformacion del tubo t' en un barómetro de gran cámara A, que puesto en comunicacion con el recipiente merced al giro adecuado de la llave R y de la existente entre a y b , provocará la extraccion de parte del aire ó gas cualquiera que llene la capacidad en cuestion. Cerrada la llave de $a b$, movida la R de modo que establezca camino hácia el embudo, y abierta la de éste, bastará elevar nuevamente á C

para expulsar el fluido salido del recipiente y dejar el aparato en disposicion de seguir funcionando. El mismo juego de llaves y el mismo subir y bajar á C pueden repetirse cuantas veces se quiera, resultando en definitiva de ello un agotamiento teóricamente indefinido.

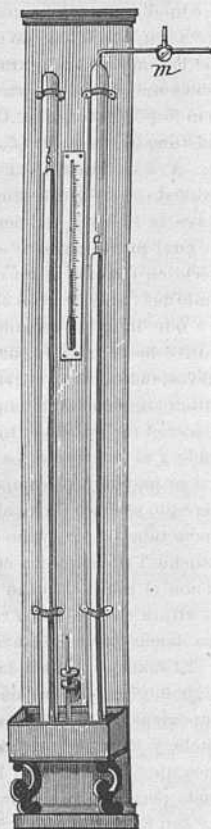
166—Con objeto de conocer en cada momento el grado de enrarecimiento conseguido, se une á las máquinas neumáticas un barómetro (fig. 125 D) envuelto en una larga probeta de la cual se extrae el aire al mismo tiempo que del recipiente; la columna de mercurio va descendiendo, claro es, á medida que se hace el vacío, hasta el punto de que si éste llegára á ser completo, el líquido metálico pasaría todo á la cubeta.

Ordinariamente dicho barómetro está truncado (fig. 124 C), es decir, tiene solo una altura de 25 ó 30 centímetros, y carece además de cubeta, en sustitucion de la cual el tubo se encorva y ofrece otra rama vertical paralela á la en que va alojada la columna de mercurio: al funcionar la máquina neumática el metal descende en una rama y se eleva en la otra, hallándose en cada instante la presion representada por la diferencia de nivel del líquido en ambas; pero teniendo en cuenta que el mercurio no empieza á bajar hasta que la presion es inferior al trozo de columna barométrica que constituye el aparato.

Mas cuando hay necesidad de medir con toda exactitud la tension en un recinto vacío se hace uso del *manómetro-barométrico* de Regnault representado en la fig. 144. Consta de una cubeta de hierro dividida en dos compartimientos, dentro de uno de los cuales se sumerge un verdadero barómetro *b*, y en el otro un tubo de cristal *a*, puesto en comunicacion por medio de la llave *m* con la máquina neumática ó con el recipiente de gas enrarecido; entre ambos existe un tornillo de hierro terminado en puntas. El mercurio debe siempre cubrir el tahique divisorio de la cubeta, para lo cual se añade el que sea preciso. Bajo la influencia del vacío sube el líquido en *a*; y la diferencia de altura de las columnas de *b* y *a* representará la presion; así como la distancia entre la punta superior del tornillo, hecho rasante con el líquido de la cubeta, y el extremo del mercurio en *b*, sumada con la longitud del tornillo será la presion atmosférica.

167—Ocurre con frecuencia el problema de mantener constante la presion dentro de un depósito de gas aun cuando el fluido esté entrando ó saliendo en él ó haciendo ambas cosas á la vez, ó sea conseguir la salida uniforme de un gas: indicaremos la solucion en dos casos particulares.

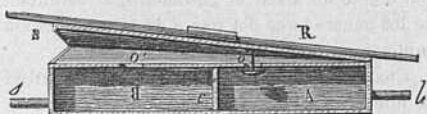
Fig. 144.



1.º El regulador de Cavaillé-Coll obvia en muchos casos la dificultad con tanta elegancia como sencillez.

Consiste (fig. 145) en una caja AB dividida por el tabique C en dos compartimientos, cada uno de los cuales comunica mediante un orificio, o y o', con el fuelle SR: la tapa de este lleva encima una pesa que puede correr á lo largo de la misma, y sostiene una válvula que abre ó cierra la abertura o segun el estado del fuelle. El tubo de entrada del aire es l, y s el de salida.

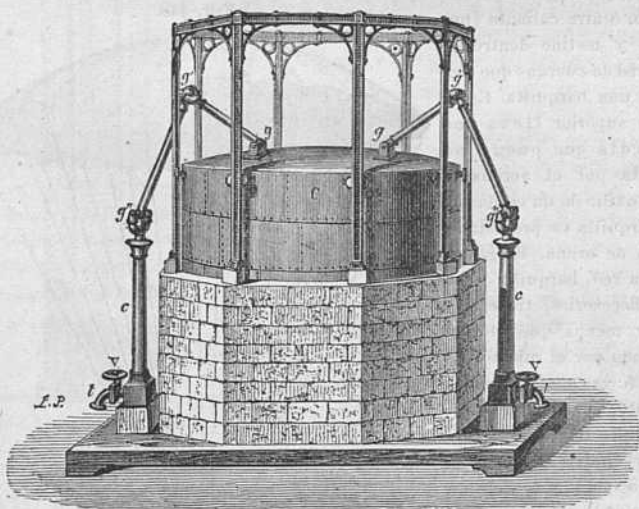
Fig. 145.



Para comprender el efecto de este aparato observemos que el gas pasa de l á A, y, por el orificio o, al fuelle, levantándolo; y desde éste por o' al compartimiento B y á s; y como mientras el fuelle funcione la presión dentro del aparato está determinada por la pesa, y la válvula de o impide la entrada de gas en cantidad tal que el fuelle pueda dejar de serlo, tenemos perfectamente asegurada la constancia de la presión, y regularizada por lo tanto la salida.

2.º El envío del gas del alumbrado desde las fábricas á las poblaciones se verifica por el intermedio de ciertos depósitos llamados *gasómetros* arreglados de manera que la salida sea próximamente constante. La fig. 146 representa una

Fig. 146.



de estas enormes capacidades, C, de palastro: es abierta por su base inferior, y se sumerge en un estanque circular de mampostería lleno de agua, manteniéndose siempre vertical merced á unas cuantas columnas de fundición entre las cuales puede subir y bajar. El gas está encerrado entre la base superior ó cúpula de C y la superficie del agua del estanque; llegando á dicho espacio por

una abertura g en comunicacion con los tubos articulados $g' g''$ y c : para la salida existe otro mecanismo igual, como se ve en el grabado. Estos conductos se hallan provistos de llaves-válvulas, V y V' , con objeto de aislar el gasómetro, á voluntad, de los generadores del gas ó de la canalizacion subterránea.

Cuando la gran caldera invertida C se llena de fluido, sale en gran parte fuera del agua y ejerce sobre el mismo la presion correspondiente á su peso; y cuando el gas corre por las cañerías, C se sumerge, y aunque su peso disminuye en virtud del principio de Arquímedes la pérdida es compensada por los tubos articulados gg' , $g'g''$ que se apoyan sobre la caldera tanto más cuanto más sumergida se encuentra.

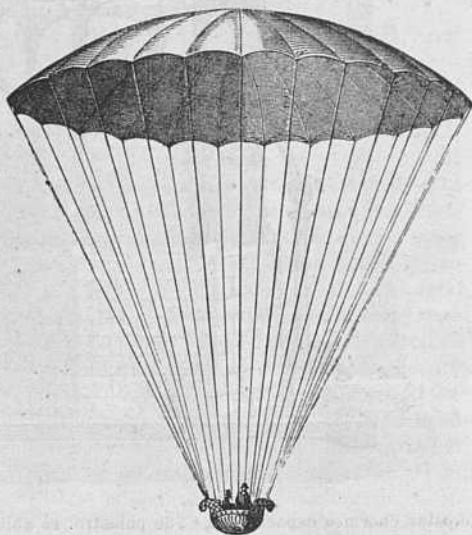
168 — La verificacion del principio de Arquímedes en los gases (150-C-2.^o) supone la posibilidad de la existencia de cuerpos flotantes en estos fluidos al modo que en los líquidos (110-b.^o); y los globos aerostáticos flotan de hecho en el aire atmosférico. Cualquiera de estos aparatos (figura 147) consiste en un depósito más ó ménos esférico de tafetan engomado, lleno de hidrógeno, gas del alumbrado, ó aire caliente (humo), y metido dentro de una red de cuerdas que sostiene una barquilla. En la parte superior lleva una válvula que puede ser abierta por el aeronauta con auxilio de un cordón, y la barquilla va provista de sacos de arena. El globo, con la red, barquilla y demás accesorios, tiene que pesar ménos que el aire ocupado por el mismo.

La fuerza ascensional del aparato, ó sea el empuje que sufre de abajo arriba, es la diferencia entre su propio peso y el del aire desalojado; de aquí que cuando el aeronauta intenta descender, deberá abrir la válvula, con lo cual el volúmen del globo disminuye, y por lo tanto tambien el peso del gas atmosférico desalojado; y cuando desee elevarse más, le bastará desprenderse de peso, ó sea ir arrojando la arena de los sacos. Para calcular la

Fig. 147.



Fig. 148.



fuerza ascensional en el momento de partida debe tenerse en cuenta que el metro cúbico de aire pesa 1,29 kilogramos, el de hidrógeno 90 gramos, y el de gas del alumbrado 750. El primer globo que en 5 de Junio de 1783 elevaron los hermanos Mongolfier, lleno de humo, tenía 815 metros cúbicos de capacidad.

El *paracaídas* (fig. 148) es una gran superficie de tela con un agujero en su centro; va sujeto á la barquilla por un sistema especial de cordaje, y en el caso de rotura del globo se extiende como un paraguas y desciende con lentitud, merced á la resistencia del aire, poniendo así á cubierto la vida del aeronauta.

169—La *pipeta ó cata-licores* (fig. 149) es un tubo abierto por ambos extremos, y de diámetro tal que puede ser cerrado con la yema del dedo; á fin de favorecer la realización del objeto á que se la destina va afilada por abajo. D, y presenta en su longitud ensanchamientos como los C y B. Sumergido este aparatito en un liquido, se llena en parte, y tapando la extremidad de arriba puede sacársele sin que el liquido, á excepcion de algunas gotas, caiga. Este efecto es debido á la diferencia de presion entre el aire libre y el del interior del aparato dilatado por la salida de una pequeña porcion del liquido.

Fig. 149.

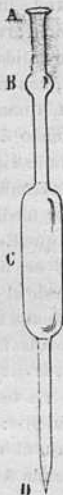
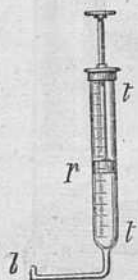


Fig. 150.

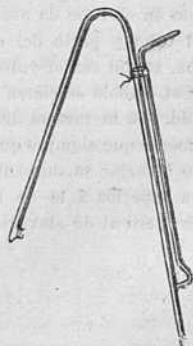


Para introducir líquidos en tubos barométricos llenos de mercurio se da á la pipeta la forma representada en el grabado 150. Consiste en un cilindro de cristal dividido en porciones de igual capacidad, en cuyo interior juega un émbolo con auxilio de su correspondiente vástago: el pico *b* va doblemente encorvado á fin de verificar la inyeccion de una manera más segura y fácil, y el piston no solo desempeña el papel que antes hemos asignado al dedo sino que además permite empujar el fluido.

Con la pipeta pueden verificarse catas en un liquido cerrándola por arriba al introducirla en el fluido y abriéndola cuando D alcanza la capa que se desea catar.

170—El *sifon* (fig. 151) es un aparato destinado á trasvasar los líquidos, y consiste sencillamente en un tubo encorvado de ramas desiguales: introducida la más corta en un depósito y hecha una succion por la más larga, el liquido corre hasta que la extremidad de la primera queda al descubierto. La causa de tal movimiento del liquido es la diferente presion atmosférica sobre las dos extremidades del aparato, por efecto de que dicha fuerza es parcial pero desigualmente destruida por las columnas desiguales de liquido contenidas en las dos ramas del sifon. En comprobacion de esta explicacion puede observarse el hecho de que los líquidos no corren cuando las dos ramas del sifon son iguales.

Fig. 151.



Como á veces los líquidos son corrosivos ó de sabores ú olores desagradables se adjunta

á la rama larga un tubito, que se ve en el grabado, á fin de practicar por él la succion sin inconveniente alguno.

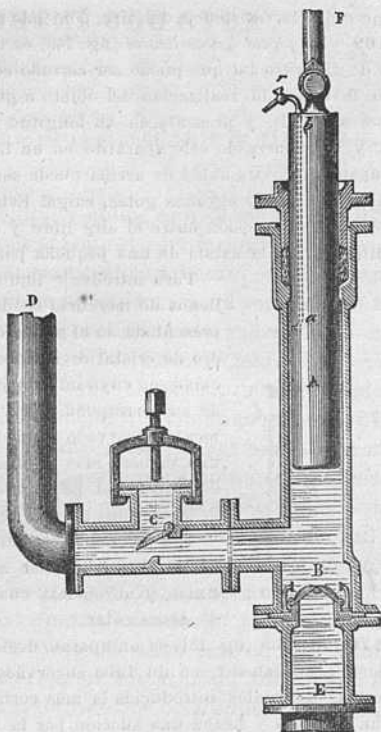
171—Dáse el nombre de *bombas* á ciertos aparatos destinados á la elevacion de los líquidos. La variedad de disposiciones que aceptan es inmensa; pero nosotros vamos á limitarnos á explicar en la fig. 152 lo esencial del mecanismo de las llamadas *aspirantes* é *impelentes*.

Constan de un cuerpo de bomba ó cilindro hueco, en cuyo interior se mueve un piston ó cilindro macizo, A, mediante un vástago cuyo origen se indica en F: en la parte inferior existe una válvula B que se abre hácia arriba; y lateralmente un tubo de salida provisto de otra válvula, C, con movimiento de dentro á fuera. Cuando el aparato se halla destinado á subir agua, por ejemplo, desde cierta profundidad, el cuerpo de bomba se prolonga hácia abajo por medio de un tubo de aspiracion E que llega hasta el líquido; y cuando se necesita trasportar el agua desde el paraje en que se encuentra situada la máquina á otro más alto, el tubo lateral se prolonga con otro, D, de elevacion, de la longitud debida.

La teoria de las bombas es la siguiente: al elevarse el émbolo queda bajo él un vacío que el aire de E tiende á llenar, abriendo la válvula B, á la vez que la presion atmosférica cierra la otra C. La consecuencia inmediata del enrarecimiento del aire interior es la entrada del líquido en el tubo de aspiracion, ó en el tubo y parte del cuerpo de

bomba, segun sea el volúmen de éste, en virtud del peso del aire exterior. Al bajar el émbolo se cierra la válvula B y se abre la C, dando salida al aire absorbido, ó á la mezcla del aire y agua. Y repetida la operacion, se consigue finalmente que siempre que A suba se llene de agua por B el cuerpo de bomba; y que al bajar se desocupe por C. El tubo de elevacion no podrá tener una altura superior á la de la columna barométrica del líquido que se haya de mover; pero al de elevacion se le puede dar cualquiera.

Fig. 152.



CAPÍTULO IV.

ESTADOS INTERMEDIOS.

§ I.—ESTADOS PASTOSO Ó VISCOSO Y PULVERULENTO.

* **172**—Entre las formas sólida y líquida de la materia no existe propiamente una línea divisoria que las separe de un modo brusco; antes al contrario, se presentan á la observacion cuerpos que comparten en más ó en ménos los caracteres de ambos estados. De estas sustancias unas veces se dice que se hallan en *estado pastoso*, y otras se las llama *sólidos ó líquidos viscosos*; sin contar con que *los cuerpos en polvo* tambien manifiestan propiedades de *estado intermedio*.

* **173-A**—La pez es una sustancia de apariencia sólida y bastante dura para no dejarse rayar por la uña; y sin embargo abandonando un trozo de este cuerpo á temperatura constante durante algun tiempo se aplasta poco á poco y acaba por correrse en todos sentidos como un líquido. El siguiente experimento es tambien sumamente curioso: si en una tabla se hace una ranura, en el fondo de ésta se colocan varios pedacitos de corcho, y sobre ella un trozo de pez cargado con unas piedrecitas, al cabo de bastantes dias la pez se ha amoldado á la ranura y las piedras están debajo y el corcho arriba: estos sólidos han atravesado, pues, la pez, de parte á parte, cual si se tratára de un líquido cuyo equilibrio estuviera regido por los principios que ya conocemos.

B—Sabemos que miéntras dura la fusion de un cuerpo, la temperatura no cambia y el sólido va pasando al estado líquido de una manera progresiva en virtud de la cual su tamaño disminuye, pero el núcleo que en cualquier momento no ha realizado aun el cambio de estado conserva sensiblemente sus caracteres mecánicos.

Tal procedimiento se halla, sin embargo, sujeto á numerosas excepciones: ciertos cuerpos, como el vidrio, no presentan, hablando en propiedad, temperatura de fusion, sino que á partir de un cierto grado de calor empiezan á ablandarse y van pasando por todos los grados de viscosidad hasta la fluidez perfecta. El hierro y el platino entre los metales, el ácido bórico, la resina y la guta-percha entre las

sustancias que no lo son, se ofrecen como ejemplos comunes del tránsito por los estados pastosos, ó intermedios entre el líquido y el sólido, á temperatura conveniente. Tambien se puede citar á este propósito la cera, cuyos grados de reblandecimiento son bien conocidos, y bastantes cuerpos grasos.

* 173—Los sólidos finamente pulverizados, y particularmente cuando están calientes, presentan multitud de fenómenos propios del estado líquido. Otro tanto podemos decir de ciertos cuerpos que poseen normalmente la blandura más ó ménos elástica conocida con los nombres de *plasticidad*, *consistencia gelatinosa*, etc.

§ II.—ESTADO LÍQUIDO-GASEOSO.

* 174-A—Así como acabamos de ver en muchos casos la continuidad indiscutible de los estados sólido y líquido, los fenómenos de que seguidamente vamos á hacer mérito acusan tambien gradual transición entre las formas líquida y gaseosa de la materia.

B—La valoración juiciosa de los experimentos referentes á este asunto exige que se tenga en cuenta que la dilatibilidad de los líquidos es incomparablemente menor que la de los gases, si bien en las inmediaciones del cambio de estado, tal propiedad se exalta en los primeros; y que al calentar un líquido pasa al estado gaseoso ó de vapor generalmente por ebullicion, á ménos que una presión energética lo impida.

* 175-A—Preocupados por el aumento brusco que en la propiedad de aumentar de volúmen experimentan los líquidos al convertirse en gases, Thilorier, Drion é Hirn han estudiado la dilatacion de aquellos cuando su ebullicion es impedida por la presión, es decir, en circunstancias tales que permaneciendo líquidos poseen temperaturas á que debieran ser gases; obteniendo como resultado de sus investigaciones el descubrimiento notable de que *los fluidos incompresibles adquieren en semejante estado la dilatibilidad de los elásticos, y aun la presentan en grado más exagerado*; así, el ácido carbónico líquido se dilata entre 0° y 30° en la mitad de su volúmen á 0°, lo cual supone un aumento cuatro veces mayor que el que experimentaría el aire en idéntico caso; la dilatibilidad del éter clorhídrico á 110° y la del ácido sulfuroso á 80 son iguales á la del aire; la del agua á 180° mitad; la del alcohol á 160° cinco veces mayor, etc.

B—Cailletet ha abordado lo cuestion de la existencia de una forma física intermedia entre la gaseosa y la líquida por un camino muy diferente; pues habiendo sometido el aire á la presión de 700

atmósferas, no logró observar disminucion alguna brusca de volúmen que indicára el tránsito al estado líquido, y en cambio el gas, reducido gradualmente á ménos $\frac{1}{450}$ de su volúmen primitivo, alcanzó la densidad 0,6 respecto del agua.

C—De todo lo cual resulta que en cada sustancia se llega por gradacion continúa, á unas ciertas temperatura y presion en que su forma líquida posee la dilatabilidad de los gases, y su forma gaseosa la densidad de los líquidos.

* 176-A—Cagniard de Latour ha practicado á este propósito un experimento tan sencillo como luminoso; dentro del tubo de vidrio *ab* (fig. 153), encorvado y cerrado por ambos extremos, colocó previamente cierta cantidad de mercurio de modo que aprisionase en la rama *a* una porcion de aire y en la *b* otra del líquido en estudio; sumergió esta rama más corta *b* en un baño caliente, á fin de determinar la produccion de vapores y de comunicarles tension; y solo con ello pudo observar la ascension del mercurio en *a*, primero, y despues una lucha entre las fuerzas elásticas del aire y del vapor del líquido, sostenida á través de la columna del metal líquido, aunque por poco tiempo, pues si bien el volúmen ocupado por el vapor aumentó algo, pronto dejó de percibirse toda línea divisoria entre el líquido y su gas, observándose en *b* no más que un fluido homogéneo cuyo volúmen era 2 á 5 veces el del líquido.

Fig. 153.

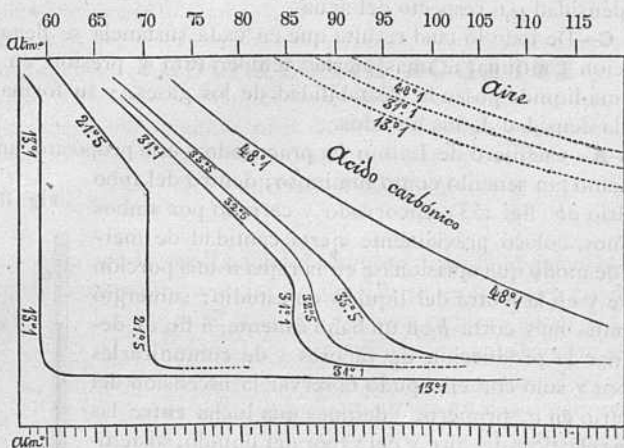


Todo parece, pues, confirmar, que en ciertas condiciones de temperatura y presion las distinciones entre los líquidos y sus vapores desaparecen; y que el empleo de la presion sola es insuficiente para producir á elevadas temperaturas el fenómeno de la liquefaccion de los gases ó vapores.

B—Pero á Andrews es á quien se deben conclusiones más terminantes acerca del estado líquido-gaseoso ó forma intermedia desde la cual parecen los estados gaseoso y líquido no más que manifestaciones extremas de un modo de estar más general de la materia. Los estudios de este fisico han versado primeramente sobre el ácido carbónico, al que sujetó á presiones crecientes dentro de un tubo de cristal formado de tres partes de pequeño diámetro (capilar la última): las temperaturas y presiones fueron medidas con gran cuidado en cada experimento, y la marcha de la disminucion de volúmen observada con particular atencion. El resultado puede expresarse gráficamente representando por oblicuas descendentes la reduccion de volúmen; por verticales el cambio de estado, y por ho-

rizontales la incompresibilidad del líquido producido, tal como se ve en el siguiente cuadro (fig. 154). A la temperatura de 13.1 empieza la liquefaccion del ácido carbónico á 48.8 atmósferas y sobreviene

Fig. 154.



una gran *caida* ó disminucion de volúmen, tras la cual el líquido se comprime más que los líquidos ordinarios, llegando por último á establecerse un estado de poca compresibilidad. A 21.5 grados la liquefaccion del gas empieza á 61 atmósferas y la caída de volúmen es ménos grande: aun entre el líquido y el gas no hay confusion posible. Pero desde que la temperatura pasa de 31.1, á medida que la presión aumenta, va haciéndose indecisa la línea que representa los dos estados y el cambio, y perdiendo su inflexion, hasta que concluye por desaparecer ésta completamente á los 48.1 y convertirse aquella casi en una recta. A 31.1 ya el ácido carbónico no cambia propiamente de estado; sino que la capacidad en que se opera aparece llena de un fluido en que se presentan ciertas estrías ondulantes cuando la temperatura desciende y baja bruscamente la presión. Desde los 48.1 la línea que representa la compresibilidad de dicho gas es análoga á las punteadas de la figura que se refieren á la del aire.

C—Los mismos fenómenos ofrecen el protóxido de nitrógeno, el ácido clorhídrico, etc.; y en definitiva al ver que desde ciertas temperaturas los gases no parecen dejar de serlo, aun reducidos al volúmen de los líquidos, surge la conclusion antes apuntada de que ambas formas físicas pueden derivar de un estado intermedio, cuyas circunstancias de existencia no son las ordinarias, ó de un punto crítico análogo al *gas perfecto*; hipótesis que explica el paralelismo observado entre las propiedades de los líquidos y las de los gases.

CAPITULO V.

ESTADOS HIPOTÉTICOS.

§ I.—MATERIA RADIANTE.

158—A—Haciendo el vacío en una capacidad llena de cualquier gas ó vapor hasta que la presión del mismo sea *una millonésima de atmósfera*, el tenue residuo gaseoso que aun llena la vasija aparece dotado de propiedades tan interesantes que Crookes se ha creído en el caso de poder considerar á los fluidos elásticos á tan mínima presión como materia en un cuarto estado á que ha dado, como sabemos (**13-B-g**), el nombre de materia radiante.

B—Partiendo de la teoría de los gases anteriormente expuesta, el citado físico establece como carácter distintivo del estado radiante la libertad absoluta ó casi absoluta de las moléculas, á cuyo efecto admite que la disminución del número de dichas particillas en la capacidad vacía reduce las probabilidades de choques ó colisiones entre las mismas hasta el punto de que la cifra representante de las veces que cada molécula entra en colisión es despreciable en comparación de la que indicaría el número de los encuentros que dejan de verificarse. En tales circunstancias el camino libre en lugar de ser una recta infinitamente pequeña, adquiere, según Crookes, dimensiones comparables á las del recinto vacío; y en resumen, para tan sagaz y hábil experimentador la gaseidez no es otra cosa que el resultado de la inmensa frecuencia de las colisiones, así como en el estado ultra-gaseoso ve la forma física en que las moléculas, disfrutando de una libertad poco menos que completa, obedecen á sus leyes sin estorbos, y exhiben más al desnudo las propiedades de la materia.

C—Las investigaciones de Crookes acerca de las propiedades diferenciales entre el gas y el ultra-gas de un cuerpo le han conducido á los siguientes resultados:

1.º Aunque las sustancias en estado radiante conservan su composición química, la conductibilidad eléctrica y calorífica de las mismas varían notablemente. Así, los cuerpos electrizados pierden pronto su electricidad en el seno de los gases, al paso que en un ultra-gas

dos láminas de pan de oro electrizadas se han conservado divergentes exactamente bajo el mismo ángulo durante trece meses. Y cuando la rapidez del enfriamiento de un cuerpo en el seno de un gas apenas varía á las presiones y vacíos ordinarios, en cambio disminuye de una manera notable en los ultra-gases; siendo mayor esta disminución en 20 y 2 millonésimas de atmósfera que entre 0,76^m y las 20 millonésimas.

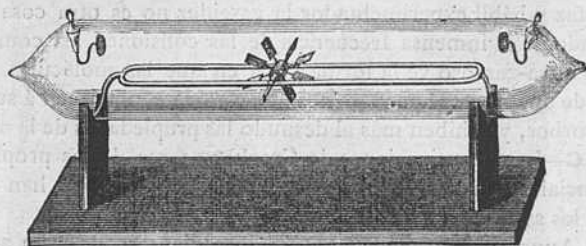
2.º En los gases las diferencias de presión entre los diversos puntos de una capacidad cerrada llena de uno de ellos desaparecen en breves momentos, mientras que en los ultra-gases duran hasta veinte y más minutos.

3.º Admitiendo que la ley de Maxwell (164-B) se verifica exactamente en los gases perfectos, Crookes explica el hecho de que la viscosidad del ácido carbónico, del vapor de agua, etc., aumente con la presión, y tanto más cuanto más cerca del cambio de estado los consideremos, por la misma razón que hemos dado al exponer análogas anomalías (145) respecto de la ley de Mariotte; y supone que las divergencias mayores y en sentido contrario observadas por él en los gases muy enrarecidos, respecto de la ley de Maxwell, indican el tránsito hácia el estado ultra-gaseoso, antagónico del líquido en cuanto á las circunstancias ó modos de su producción á partir del gas perfecto.

* 159—Pero las propiedades ó fenómenos más curiosos de la materia en estado radiante son los que ofrece bajo la influencia de la electricidad, del magnetismo, y del calor; á consecuencia, probablemente, de que las moléculas libres al chocar con un cuerpo caliente ó con unos electrodos parecen adquirir una fuerza de proyección notable.

El aparato fig. 155 demuestra una acción mecánica producida bajo la influencia de la corriente eléctrica. Consiste en un tubo de cristal

Fig. 155.



cerrado y lleno de un ultra-gas, en cuyo interior existe un carril compuesto de dos barritas de vidrio paralelas sobre las cuales descansa un eje de paletas de mica; á los extremos de este recinto se ven

dos electrodos de aluminio. Puestos los electrodos en comunicacion con una bobina de induccion, la ruedecilla gira y corre á lo largo del carril, del polo negativo al positivo. Y como segun la ley de reaccion (Mec.) los electrodos deben experimentar una tendencia al movimiento en sentido contrario, Crookes ha construido un radiómetro de paletas de aluminio revestidas por una de sus caras con hojitas de mica, y haciendo atravesar por el eje y las paletas una corriente eléctrica, ha observado efectivamente la rotacion del electrodo móvil así constituido.

La fig. 156 representa el mismo fenómeno realizado bajo la influencia del calor. Consiste en un radiómetro de discos de mica *b* inclinados 45° , debajo de los cuales existe un hilo de platino que puede ponerse en comunicacion con una bobina: llevado este alambre á la incandescencia, bajo la influencia de la corriente eléctrica, el molinete gira con gran velocidad.

Crookes ha demostrado además que las corrientes moleculares de los ultra-gases son rectilíneas; y así lo confirma el siguiente experimento que á la vez exhibe otra de las propiedades más notables de

Fig. 156.

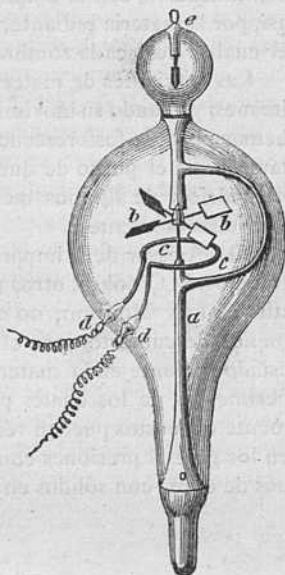
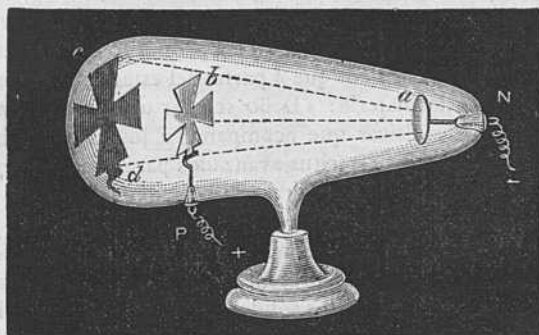


Fig. 157.



la materia radiante puesta en movimiento por la electricidad, la de desarrollar la fosforescencia en los cuerpos sobre que choca: en un tubo de vidrio cónico (fig. 157) conteniendo un ultra-gas se coloca

una cruz de aluminio *b* haciendo de polo positivo y en el extremo más agudo se sitúa el electrodo negativo; y desde que se establece la comunicación con la bobina, todo el tubo, bombardeado, digámoslo así, por la materia radiante, aparece luminoso, ménos el fondo *d* sobre el cual se destaca la sombra de la cruz.

Las corrientes de materia radiante son además desviadas por los imanes; y cuando su movimiento se detiene, no solo desarrollan, como hemos visto, la fosforescencia, sino que los obstáculos llegan á calentarse hasta el punto de que Crookes ha logrado producir la fusión del vidrio y de algunos metales concentrando en un punto la acción de dichas corrientes.

* 160—A pesar de la importancia verdaderamente excepcional de los trabajos de Crookes, otros no ménos distinguidos físicos, como Spottiswoode y Moulton, no encuentran motivo suficiente en los fenómenos descubiertos por el primero para admitir la existencia del estado radiante de la materia; fundándose para ello en hábiles experimentos de los cuales parece deducirse que los hechos anteriormente expuestos pueden realizarse en escala mayor ó menor no solo en los gases á presiones comparables á las ordinarias, sino aun, algunos de ellos, con sólidos en polvo.

§ II.—EL ETER.

* 180—Llegados al límite de nuestros conocimientos respecto de las formas físicas de la materia, y antes de decir dos palabras acerca de la última, ó sea de la fecunda hipótesis de la *materia etérea*, creemos oportuno consignar las dos siguientes observaciones sintéticas.

1.^a El eminente Faraday, que á principios del siglo preveía ya la existencia de la materia radiante, dice á propósito de la disminución gradual de caracteres físicos que á partir del estado sólido se observa en las formas de la materia: « Debo señalar una progresión notable » en las propiedades físicas que acompañan á los cambios de estado, » que puede bastar á los espíritus avanzados para añadir el estado radiante á los otros estados de la materia ya conocidos. »

« A medida que nos elevamos del estado sólido al líquido y de este » al gaseoso, vemos disminuir el número y la variedad de las propiedades físicas de los cuerpos, presentando cada estado algunas ménos » que el precedente. Cuando los sólidos se trasforman en líquidos todo » vestigio de dureza desaparece y las formas, sean ó no cristalinas, » dejan de existir. La opacidad y el color son de ordinario reemplazados por una transparencia incolora, y las moléculas de los cuerpos » adquieren una movilidad casi completa. »

«Si consideramos el estado gaseoso vemos menguarse el número de caracteres de los cuerpos; las grandes diferencias que existían entre sus pesos casi han desaparecido; las huellas de coloración que habían conservado concluyen; todos los cuerpos en estado de gas son diáfanos y elásticos, no forman más que un género de sustancias; y las diferencias de densidad, de dureza, de opacidad, de color, de elasticidad y de forma, que constituyen el infinito número de sólidos y líquidos, están reemplazadas por pequeñísimas variaciones de peso y alguna débil coloración.»

«De esta manera, léjos de ser un obstáculo para los que admiten la materia radiante, la simplicidad de propiedades que caracteriza tal estado, constituye un argumento en favor de su existencia. Hasta ahora se ha hecho constar una desaparición gradual de las propiedades de la materia á medida que se eleva en la escala de las formas, y sería absurdo suponer que estos efectos se detuvieran en el estado gaseoso. Se ve á la naturaleza realizar grandes esfuerzos para simplificarse más y más en cada cambio de estado, y es lógico pensar que este esfuerzo puede ser mucho mayor al pasar más allá del estado gaseoso.»

2.^a Completa el anterior cuadro de la evolución gradual de las formas físicas de la materia la consideración de que el tránsito de unas á otras es mucho más insensible de lo que se ha venido creyendo. Colocados, en efecto, desde el punto de vista de los cuerpos viscosos se borra toda línea brusca entre los sólidos y los líquidos; desde el estado líquido-gaseoso, no parecen estas dos formas más que dos manifestaciones divergentes ú opuestas de una sola; y el gas perfecto es punto de partida para Crookes hácia la condición subgaseosa ó líquida en un sentido y hácia el estado ultra-gaseoso en otro.

Pero ¿y más allá de la materia radiante, cómo existe físicamente la materia?

181—A—En el orden de la disminución gradual de las propiedades de la materia desde el estado sólido al gaseoso, sobre que ha llamado la atención Miguel Faraday, podemos salvar los límites de todas las formas experimentalmente conocidas y concebir la existencia de un fluido sutilísimo dotado tan solo de elasticidad y de densidad; con lo cual, y admitiendo además (**13-C**) que semejante cuerpo llenase los espacios interestelares é intermoleculares, fuese una especie de océano universal en que todo está sumergido y de que todo está impregnado, tenemos una idea exacta de la *forma hipotética de la materia* designada con el nombre de *éter*.

B—La noción del éter es hoy tan necesaria, se impone con tal fuerza y evidencia en el estado actual de la Física, que, aunque *ficcion científica*, se habla de él con la misma seguridad que de las restantes formas reales de la materia. El hombre no conoce otro vehículo de la energía que la materia, ni más carácter fundamental de la materia que el no estar nunca desprovista de energía; y al observar que la energía se traslada al través de los espacios en que no hay sólidos, líquidos ni gases, se ve lógicamente obligado á suponerlos llenos de materia.

C—Hé aquí algunos hechos sencillos sacados de entre los que sirven para inducir la existencia del éter:

1.º Golpeando un cuerpo *se calienta*; y el calor puede atravesar una campana en que se haya hecho el vacío, elevando á la vez la temperatura del cristal en los puntos por donde entran y salen los rayos térmicos.

Golpeando un cuerpo *suenan*; y los rayos sonoros pueden atravesar una habitación con dos vidrieras opuestas, poniéndolas en cierto estado de trepidación que todo el mundo ha tenido ocasión de observar.

La analogía entre ambos hechos no puede ser más evidente: en el momento del choque la fuerza mecánica se transforma en energía sonora ó calorífica; el aire ó el éter sufren deformaciones elásticas que propagan (90) obedeciendo á la tendencia de la energía (15) á la diseminación; y al tropezar con el vidrio los rayos realizan una comunicación de movimiento inversa calentándolo ó haciéndolo sonoro. La circunstancia de haber éter en el espesor del vidrio y no aire, es la única diferencia esencial entre ambos fenómenos.

2.º Concentrando sobre una caldera de hierro cerrada y llena incompletamente de agua los rayos del sol, el líquido hierve y el vapor adquiere tensión suficiente para poderlo utilizar en una máquina y realizar trabajos mecánicos. De no admitir el éter, y que son materia en movimiento las radiaciones del astro central, en este ejemplo habria *creación* de fuerza, lo cual repugna como un absurdo contrario al principio de conservación de la energía.

El experimento no altera colocando la caldera en el vacío.

3.º La luz y el calor se propagan con una velocidad aproximada de 300 millones de metros por segundo, como vere-

mos más adelante; de la misma manera que el sonido avanza en igual tiempo 330 metros en el aire. Aceptando que unos y otros fenómenos son en nosotros el resultado de la impresión sobre los sentidos de los movimientos vibratorios propagados por el éter ó por la atmósfera respectivamente, y suponiendo aplicable á ambos casos la fórmula de Newton (**85**)

$$V = \sqrt{\frac{E}{D}}$$

se comprende cuán grande debe ser la elasticidad del éter ó pequeña su densidad: un cuerpo con la elasticidad del hierro (el más elástico de los conocidos) y la densidad del hidrógeno (el más ligero de los gases) enrarecido á un milímetro, propagaría una vibración con una velocidad no más que de 60 millones de metros.

El paso de la luz y del calor á través de los gases, del cristal, etc., indica que el éter existe en el interior de los cuerpos; y la circunstancia de que la velocidad de los rayos varía en el seno de las sustancias transparentes, según demostraremos oportunamente, acusa cambios de unos á otros parajes del universo en la elasticidad ó en la densidad del éter, ó en ambas propiedades á la vez.

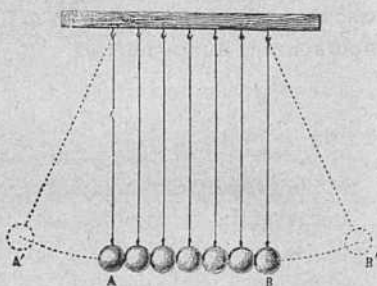
En su día mediremos además la longitud (**81**) de las ondas etéreas y la rapidez de las vibraciones de las moléculas de esta forma física de la materia; y al encontrarnos con que una de tales partecillas puede dar 708 billones de vibraciones por segundo, no extrañáremos que el éter sea vehículo en muchos casos de enormes cantidades de fuerza viva.

4.º Las atracciones eléctricas y magnéticas (**14-B-1** y **11**) se verifican, tal cual las hemos descrito, aun cuando el péndulo eléctrico ó la aguja imantada estén dentro de una campana vacía y el cuerpo electrizado ó el iman fuera de la misma. Y en otro lugar estudiaremos además detalladamente cómo la electricidad y el magnetismo se producen gastando fuerza mecánica, y, viceversa, pueden convertirse en fuerza y realizar trabajos mecánicos, sin que en unos y otros fenómenos, que necesariamente deben verificarse sirviendo de intermedio la materia, pueda asignarse el papel principal á ninguna de las formas físicas ponderables de la misma.

5.º La circunstancia de que muchos cuerpos no permiten fácil paso á las radiaciones caloríficas, luminosas, etc., sólo significa que el éter no conserva dentro de las diversas sustancias y formas físicas iguales condiciones de movilidad; pues la propagacion de la electricidad y del calor llamada por conductibilidad, bien de capa en capa ó bien poniendo una masa en contacto con otra electrizada ó caliente (hecho que con gran facilidad puede demostrarse experimentalmente), exhibe á rigor un fenómeno, entre las partículas ó los átomos de los referidos cuerpos malos conductores, idéntico al que tiene lugar entre dos de ellos separados á distancia.

D—Los anteriores hechos de comunicacion y trasformacion de las formas de la energía, así como la mayor parte de los fenómenos de la Física, tienen explicacion natural dentro de la concepcion del éter, pues de molécula á molécula, de cuerpo á cuerpo, y de astro á astro, filas de particillas de dicha forma de la materia desempeñarán un papel comparable al de las bolas elásticas A... B en el aparato representado por la fig. 158, al practicarse con el mismo el experimento siguiente:

Fig. 158



haciendo oscilar la esfera A de modo que choque con la inmediata, la fuerza viva se traslada de una en otra hasta la B, en la cual aparece el movimiento de la A, empleando para ello un tiempo proporcionado á la distancia entre ambos puntos extremos.

182—A—Una vez admitida la existencia del fluido etéreo, lo que sí se comprende perfectamente, dada la universalidad del mismo, es que en él resida la causa de todos los fenómenos observables, hechos mecánicos en definitiva, ó que al ménos deba modificarlos, propagarlos y complicar sus leyes. Y desde luego, muchos y eminentes físicos que no ven en esas existencias misteriosas é incomprensibles llamadas atraccion universal, elasticidad, cohesion, afinidad, etc., sino hipótesis de

coordinacion (útiles sin duda en nuestra ignorancia actual, pero que los progresos de la ciencia harán desaparecer), consideran á dichos fenómenos como meras consecuencias de movimientos del éter en cuyo seno están aprisionados los sólidos, los líquidos y los gases; al modo que se explican ya por todos racionalmente el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo haciendo intervenir al referido fluido universal.

B— Téngase, sin embargo, en cuenta que cuanto se fantasea sobre la constitucion del éter, sobre los movimientos propios de sus particillas, sobre el papel que desempeña en los fenómenos de las atracciones moleculares y atómicas, sobre la parternidad, que se le atribuye, de las restantes formas de la materia, etc., es simplemente amontonar hipótesis sobre hipótesis sin utilidad ni fundamento alguno. Tales problemas están reservados para el mañana de la ciencia, no pasando hoy de la categoría de ideales, porque se carece totalmente de base para plantearlos dentro del terreno positivo de la experimentacion y de los hechos.



RECTIFICACIONES.

Página 24, línea 22: dice, *¿ó coexisten ambas?* Léase: *¿ó son coexistentes ambas?*

Página 56, línea 30: dice, *racionalmente su origen*; léase, *racionalmente el origen de toda ella*.—Línea 36: dice, *Esta energía debe tener*; léase: *Parte de tal energía debe tener, pues,*

Página 63, línea 8: dice, *la de compuestos que, siéndolos*; léase, *la de compuestos que funcionan como simples, y la de otros que, siéndolos.*

Página 70, línea anteúltima: dice, *que tienen su misma base é igual altura*; léase, *que tienen iguales bases y la misma altura.*

Página 71, línea 15: dice, *y como, segun la segunda ley de Kepler*; léase, *y como, segun la tercera ley de Kepler.*

Página 91, línea 7: dice, *ó $\frac{4}{3} \equiv R^2$* ; léase, *ó $\frac{4}{3} \pi R^2$*

Página 97, línea 5: dice, *$\frac{1}{E} + \frac{l}{L}$* léase, *ó $\frac{1}{E} \times \frac{l}{L}$*

Página 99, línea 5: dice, *el nivel de agua*; léase, *el nivel del agua.*

Página 101, línea 7: dice, *74-A-a*; léase, *74-A-*

Página 103, línea 3: dice, *Estas leyes*; léase, *b-Estas leyes.*

Página 111, línea 17: dice, *igualdad que permite calcular dos de las cantidades conocida*; léase, *igualdad que permite calcular dos de las cantidades V, L, T, conocida.*

Página 119, línea 15: dice, *El prismático oblicuo de base rectangular*; léase, *El prismático oblicuo de base romba.*

Página 141, línea 30: dice, *corta á la del centro de gravedad*; léase, *corta á la direccion oblicua que toma la primitiva vertical del centro de gravedad.*

Página 148: el párrafo **C** debe ir en letra del cuerpo g.

Página 160, línea anteúltima: dice, *las moléculas CD*; léase, *las moléculas GD.*

ÍNDICE ALFABÉTICO.

A

- Afinidad, pág. 31.
Atraccion universal, págs. 31 y 69.
Adhesion, pág. 34.
Aguja imantada, pág. 37.
Atomo, pág. 40.
Anillo de S. Gravesande, pág. 43.
Aceleracion de la gravedad, pág. 80: su determinacion, pág. 85: sus variaciones, pág. 87.
Aparato de Wertheim para la elasticidad de traccion, pág. 95: idem para la de torsion, pág. 101.
Anillos liquidos, pág. 148: gaseosos, pág. 196.
Accion del calor sobre los fenómenos capilares, pág. 160.
Aparato de salida constante de Escriche, pág. 168.
Aerómetro de Nicholson, pág. 175: de Fahrenheit, pág. 176.
Atmósfera, págs. 180 y 191.
Amagat; sus experimentos sobre la compresibilidad de los gases, páginas 183 y 185.
Andrews; sus experimentos sobre el estado liquido-gaseoso, pág. 216.

B

- Balanza ordinaria, pág. 89: de Cavendish, pág. 91: hidrostática, pág. 140.
Batido, pág. 123.
Botella de los cuatro elementos, página 143.
Barómetro de cubeta profunda, página 184.
Barómetro de Fortin, pág. 192: truncado, pág. 210.
Baróscopo ó dasimetro, pág. 195.
Berthollet (experimento de) pág. 197.
Bunsen, aparato para demostrar la ley de la salida de los gases, pág. 206.
Bombas, pág. 214.

C

- Cuerpos: definicion, pág. 11: tabla de los simples, pág. 25: isotropos, pág. 39: anisotropos, pág. 105: flexibles, pág. 129: quebradizos, página 131: flotantes, pág. 141.
Catetómetro, pág. 21.
Cronómetro de segundos, pág. 22.
Cohesion, pág. 33: de los liquidos, pág. 146: de los gases, pág. 195.
Calor, pág. 35: forma de movimiento, página 51: sus efectos fisicos, página 52.
Caloria, pág. 38.

- Constitucion material de los cuerpos, págs. 40 y 48.
Compresibilidad, pág. 42: de los liquidos, p. 144: de los gases, p. 177.
Constitucion dinámica de los cuerpos, págs. 51 y 60.
Calor latente, pág. 53.
Cero absoluto, pág. 55.
Caida de los cuerpos, pág. 72.
Centro de gravedad, pág. 77: su determinacion, p. 78: de presion, p. 139.
Coeficiente de compresibilidad lineal, pág. 97: idem de cúbica, pág. 125: de torsion, pág. 103: de compresibilidad de los liquidos, pág. 144: de difusion, pág. 155: de disolucion de los gases, pág. 201.
Condensaciones y dilataciones (ondulacion longitudinal), pág. 109.
Cristales, pág. 117.
Constante capilar, pág. 149.
Cristaloideos y coloides, pág. 156.
Capilaridad, pág. 157: su teoria, p. 160.
Contraccion de la vena liquida, página 164: su explicacion, pág. 165: idem de la gaseosa, pág. 204.
Cámara barométrica, 193.
Crookes, sus trabajos sobre el estado ultra-gaseoso, págs. 219 á 222.

D

- Divisibilidad, págs. 39 y 42.
Dilatabilidad, pág. 42.
Densidad, pág. 45: de los gases simples respecto del hidrógeno, página 47: de la Tierra, pág. 92: su determinacion en sólidos y liquidos, págs. 175 y 176.
Demostracion de las leyes de la gravitacion, pág. 70.
Direccion de la gravedad, pág. 76.
Dobles pesadas, pág. 90.
Depresiones y elevaciones (ondulacion transversal), pág. 112: idem capilares, pág. 157.
Dimorfismo, pág. 120.
Deformaciones permanentes, pág. 125.
Ductilidad, pág. 128.
Dureza, pág. 129.
Difusion de los liquidos, pág. 154: de los gases, pág. 197.
Diálisis, pág. 157.
Densimetro de Rousseau, pág. 176.
Disolucion de los gases, pág. 200.
D'Aubuisson: trabajos sobre las corrientes gaseosas, pág. 207.

E

- Ecuacion de la cantidad de movimiento, pág. 14.

Ecuacion de la fuerza viva, pág. 14.
 Energia actual y potencial, pág. 15:
 total, pág. 16; tendencia a estar
 uniformemente repartida en el uni-
 verso, pág. 37.
 Esferómetro, pág. 22.
 Estados de los cuerpos, pág. 26: só-
 lido, págs. 27 y 117; liquido, pági-
 nas 27 y 133; gaseoso, págs. 27 y
 177; pastoso, págs. 27 y 215; liqui-
 do gaseoso, págs. 27 y 216.
 Eter, págs. 28, 48 y 222.
 Elasticidad, págs. 29 y 93: coeficiente
 de—pág. 97; de los cuerpos anisó-
 tropos, pág. 105: elasticidad resi-
 dual, pág. 131.
 Electricidad, pág. 35: forma de mo-
 vimiento, pág. 52.
 Equivalentes, pág. 42: tabla de los—
 pág. 25: electivo-químicos, pág. 58:
 osmométricos, pág. 156.
 Eslabon neumático, pág. 43.
 Energias residentes, págs. 57 y 59.
 Equilibrio de los sólidos, pág. 79: de
 los cuerpos flotantes, pág. 141.
 Estructura de los sólidos, págs. 117
 y 122: sus modificaciones, pág. 123.
 Exfoliacion, pág. 121.
 Endósomose y exósomose, pág. 156.
 Enunciado de Torricelli, pág. 168: en
 los gases, 204.
 Expansibilidad, pág. 177.
 Espacio perjudicial, pág. 187.
 Estado pulverulento, pág. 216.

F

Fenómeno, pág. 12:—de combina-
 cion, pág. 56.
 Fuerza, pág. 13: concepto de la fuer-
 za, págs. 13 y 14; fuerza mecánica,
 pág. 34: fuerzas atractivas y repul-
 sivas, págs. 14 y 58.
 Formas de la materia, pág. 24: qui-
 micas, pág. 25: físicas, pág. 26.
 Formas de la energia, pág. 28.
 Fórmulas de la caida de los cuerpos,
 pág. 70.
 Flecha de flexion, 103.
 Fórmulas de la velocidad de propa-
 gacion del movimiento ondulado-
 rio, pág. 111.
 Forma de los sólidos, págs. 117 y 118:
 formas primitivas, pág. 121.
 Fragilidad, pág. 129.
 Filtracion, págs. 172 y 207.

G

Gravitacion, págs. 31 y 69.
 Gravedad, págs. 31 y 72.
 Gasto de un orificio, pág. 168.
 Gas perfecto, pág. 185.
 Gasómetro, pág. 211.
 Globo aerostático, pág. 212.

H

Horizontal, pág. 76.
 Hemiedria, págs. 120 y 122.
 Hiera, pág. 128.

Haldat (aparato de), pág. 137.
 Hemisferios de Magdeburgo, pági-
 na 192.

I

Inercia, pág. 18.
 Intensidad de la gravedad, pág. 80.
 Isomorfismo, pág. 120.
 Imbibicion, pág. 163.

J

Jamin, págs. 100, 145 y 165.

K

Kepler, leyes de—pág. 69.

L

Ley de conservacion de la materia,
 pág. 12.
 Ley de conservacion de la energia,
 pág. 15: su generalizacion al uni-
 verso, pág. 17.
 Luminosidad, pág. 35.
 Ley de la equivalencia de las fuerzas
 naturales, pág. 38.
 Ley de las proporciones definidas y
 de las proporciones múltiples, pá-
 gina 40.
 Leyes de la gravitacion, pág. 69.
 Leyes de Kepler, pág. 69.
 Leyes de la caida de los cuerpos,
 pág. 72.
 Leyes del péndulo, pág. 83.
 Leyes de la elasticidad de traccion,
 pág. 94: idem de torsion, pág. 102:
 idem de flexion, pág. 104.
 Limite de elasticidad, págs. 125 y 127.
 Laminador, pág. 126.
 Ley de Fick, pág. 155.
 Leyes de Borelli y Laplace, pág. 159.
 Ley de Bossut, pág. 171: de Leonardo
 de Vinci, pág. 171: de Poiseuille,
 págs. 171 y 207.
 Ley de Mariotte, pág. 177.
 Ley de Dalton relativa a la mezcla
 de gases, pág. 198: leyes de Dalton
 referentes a la disolucion de los
 gases en los líquidos, pág. 200.
 Ley de Henry, pág. 203.
 Ley de Thomsson, pág. 206.
 Ley de Maxwell, pág. 208.

LL

Llave de Babinet, pág. 188.

M

Materia: definicion, pág. 11: radian-
 te, págs. 28 y 219.
 Magnetismo, pág. 37.
 Moléculas, pág. 41: su grado de mo-
 vilidad en los diversos estados de
 los cuerpos, pág. 54.
 Masa física, pág. 44: mecánica, pá-
 gina 45: de la Tierra, pág. 91.
 Máquina de Morin, pág. 73.

Movimiento oscilatorio, pág. 82: ondulatorio, págs. 107 á 114.
Maleabilidad, pág. 125.
Molinete hidráulico, pág. 138.
Mira, pág. 174.
Manómetros, págs. 180 y 181.
Máquina neu rática ordinaria, página 186: de mercurio, pág. 200: contraneumática, pág. 188.
Manómetro barométrico de Regnault pág. 210.

N

Nonius ó Vernier, pág. 19.
Nivel de agua, pág. 174: de aire, pág. 174.

O

Oscilacion, pág. 82.
Ondulacion longitudinal, pág. 109: transversal, pág. 112.
Oclusion de los gases, pág. 202.

P

Péndulo eléctrico, pág. 36.
Par eléctrico, pág. 36.
Polos positivo y negativo, boreal y austral, pág. 37.
Pesos atómicos y moleculares, páginas 41 y 47: tabla de los—pág. 25.
Poros físicos, pág. 44.
Peso, págs. 45, 77 y 88: específico, páginas 46 y 175.
Partículas, pág. 48.
Plomada, pág. 76.
Péndulo, pág. 81: su longitud, página 85: péndulo de Kater, pág. 86.
Presion, págs. 30 y 93: molecular, pág. 150.
Propagacion de las deformaciones, págs. 105 á 114.
Principio de Pascal en los líquidos, pág. 133: en los gases, pág. 189.
Principio de Arquimedes en los líquidos, pág. 139: en los gases, página 195.
Piezómetro, pág. 144.
Plateau, experimentos de cohesion de los líquidos, págs. 146 y 147.
Prensa hidráulica, pág. 173.
Peso de los gases, pág. 190.
Para-caidas, pág. 212.
Pipeta, pág. 213.

Q

Quincke, sus trabajos sobre el ángulo de conjuncion, pág. 161.

R

Relacion entre la materia y la energia, págs. 18 y 19.
Relacion entre la energia eléctrica y la afinidad, pág. 57.
Relacion entre las variaciones de longitud, seccion y volúmen en las varillas estiradas, págs. 98 y 99.

Recocido, pág. 124.
Resistencia relativa, pág. 130: transversa, pág. 131.
Rozamiento interior de los sólidos, pág. 131: idem exterior de idem, página 132: interior de los líquidos, pág. 172: idem de los gases, página 207.
Regnault, experimentos para comprobar la ley de Mariotte, pág. 182.
Rompe-vejigas, pág. 191.
Regulador de Cavallé-Coll, pág. 211.

S

Sonoridad, pág. 35.
Sistemas cristalinos, pág. 119.
Savart, experimentos de choque de venas, págs. 148 y 149.
Sólidos porosos (accion capilar de), pág. 163.
Surtidores, pág. 165.
Sondhaus, choque de venas gaseosas, pág. 197.
Sifon, pág. 213.

T

Tension de los gases, pág. 34.
Termómetro, págs. 48 y 49.
Temperatura, pág. 48.
Traccion, págs. 30 y 93.
Torsion, págs. 31 y 101.
Temple, pág. 124.
Tenacidad, pág. 130.
Tribómetro, pág. 132.
Tension superficial, págs. 149 y 152.
Teoria de los gases, pág. 178.
Tubo de Cagniard de Latour, página 217.

U

Unidad de temperatura pág. 49: de las fuerzas físicas, pág. 50: de la materia, págs. 32 y 62.

V

Viscosidad, pág. 34: de los gases, página 208.
Volúmen aparente y real, pág. 44: atómico, pág. 47.
Vertical, pág. 76.
Vibracion, pág. 106.
Vena sólida, pág. 126: líquida, página 164: gaseosa, pág. 203.
Velocidad media de las moleculas de un gas, pág. 179: de salida de los líquidos, págs. 168 y 171: de difusion de los gases, pág. 199: de salida de un gas, págs. 204 á 207: de propagacion del calor y la luz, página 224: del sonido, pág. 224.

W

Wertheim: sus trabajos sobre la elasticidad, págs. 91, 95, 97, 98, 99, 100, 101 y 103.

