



MUSEO PEDAGOGICO  
DE CHILE

Adquirido.....  
Biblio. Nacional.  
Donante.....  
17- III- 1970.  
Fecha.....

MUSEO PEDAGOGICO  
DE CHILE

Inventario.

Sala N.<sup>o</sup>.....

N.<sup>o</sup> de orden.....





W. ZIEGLER y L. GOSTLING

# FÍSICA EXPERIMENTAL

TOMO II

FÍSICA MOLECULAR, TEORÍA DE LAS ONDAS,  
ACÚSTICA, CALOR Y MAGNETISMO.

Texto aprobado por el H. Consejo de Instrucción Pública.

EDITORIAL NASCIMENTO



# FÍSICA EXPERIMENTAL

530  
266  
193  
T. 2

*P. F. Veldin*

POR

DR. W. ZIEGLER

Y

L. GOSTLING

Ex-Prof. de Física del Instituto Pedagógico y ex-miembro docente de la Facultad de Filosofía y Ciencias de la Educación de la Universidad de Chile.

Prof. de Física de las Escuelas de Ciencias Médicas y de Química y Farmacia y miembro docente de la Facultad de Biología y Ciencias Médicas de la Universidad de Chile.

## FÍSICA MOLECULAR, TEORÍA DE LAS ONDAS, ACÚSTICA, CALOR Y MAGNETISMO.

Texto aprobado por el H. Consejo de Instrucción Pública.

MUSEO PEDAGOGICO  
CARLOS STUARDO UÑIL  
BIBLIOTECA

*W. Ziegler*  
*L. Gostling*

TOMO II

SÉPTIMA EDICIÓN.

*R*

14660

EDITORIAL NASCIMENTO  
SANTIAGO CHILE CONCEPCION  
1936

Es propiedad de los  
autores.  
Inscripción núm. 67

16 JUL. 1985

## Prólogo.

He aquí la séptima edición del presente texto, que ofrecemos respetuosos a profesores y alumnos de nuestros establecimientos de segunda enseñanza.

De acuerdo con las tendencias modernas hemos hecho de los experimentos la base fundamental del estudio de la Física: ellos son el punto de partida de todos los conocimientos que van a interesar a los alumnos; las consecuencias deducidas de ellos mantienen sin embargo, su precisión matemática, para que así sean duraderas y de aplicación real y no ideas vagas que pronto se olvidan.

Hoy por hoy no se concibe la Física divorciada de las Matemáticas; éstas constituyen un factor indispensable, imprescindible para el estudio de la Física.

Los alumnos deben tener un rol activo en clase y, cuando no hubiere peligro en ello, deben hacer ellos mismos los experimentos o colaborar como ayudantes en su desarrollo.

No siempre los profesores tendrán el material de enseñanza que permita efectuar precisamente los experimentos de nuestro texto y su criterio personal les indicará las reformas que haya que introducir en ellos.

Intercalados en el texto van problemas resueltos y por resolver y preguntas concernientes a la materia tratada y que deben ser contestadas por los alumnos; recomendamos a nuestros colegas no pasarlos por alto.

Igualmente hemos introducido trabajos prácticos que deben ser efectuados por los alumnos. No será posible hacerlos por cada alumno individualmente a causa de la falta de material y de local, pero sí por grupos.

Esta edición ha debido adaptarse a las reformas del programa que en él han introducido las autoridades educacionales, la mayor parte de las cuales son meros cambios de orden de la materia.

Este tomo contiene toda la materia asignada al quinto año de humanidades; sin embargo hemos cambiado el orden fijado en el programa para darle el que nosotros consideramos más lógico.

Por otra parte a las materias nuevas introducidas en el programa les hemos dado quizá mayor extensión que la que habrán deseado

los autores del nuevo programa, como ser a la osmosis, a la capilaridad, etc.

Los autores del texto tenemos la íntima convicción de que la mera exposición de un fenómeno no tiene importancia si no se lo estudia con cierta seriedad.

Los profesores, al tratar la materia, le darán el orden y la extensión que les indique como la más conveniente su experiencia personal.

Las materias de Mecánica que deben estudiarse en este curso están incluídas en el tomo I.

Una vez más queremos insistir en el agrado con que recibiremos todas las insinuaciones que nos hagan nuestros colegas sobre las reformas que puedan introducirse en las nuevas ediciones de estos textos y agradecemos la benevolencia con que los han preferido hasta hoy.

Santiago de Chile, Octubre de 1936.

DR. W. ZIEGLER,  
Casilla 1389.

LUIS GOSTLING,  
Casilla 2006.

# INDICE

Págs.

PRÓLOGO.....	III
--------------	-----

## FISICA MOLECULAR.

INTRODUCCIÓN.....	1
Constitución de la materia.....	1
Fuerzas moleculares.....	3
Cuerpos sólidos.....	4
Elasticidad.....	4
Tracción.....	5
Compresión.....	8
Torsión.....	9
Cuerpos líquidos.....	10
Compresibilidad.....	10
Adhesión entre cuerpos sólidos y líquidos.....	11
Presión de cohesión o tensión superficial.....	11
Forma de la superficie líquida en contacto con un sólido.....	15
Capilaridad.....	16
Disoluciones.....	18
Difusión.....	19
Osmosis.....	19
Dialisis.....	19
Cuerpos gaseosos.....	22
Oclusión.....	22
Disolución de gases.....	23
Difusión y osmosis.....	23
Teoría cinética de los gases.....	25

## TEORIA DE LAS ONDAS.

Movimiento oscilatorio.....	27
Ondas transversales.....	27
Ondas longitudinales.....	29
Interferencia de ondas.....	30
Reflexión de una onda sobre un medio más denso.....	33
Reflexión de una onda sobre un medio menos denso.....	34
Medios en que pueden propagarse las ondas.....	35

## ACUSTICA.

Producción de ruidos y sonidos.....	37
Propagación del sonido.....	38
Intensidad del sonido; su disminución a la distancia.....	39
Reflexión del sonido. Eco.....	41
Altura de los sonidos.....	42
Sirena de Savart.....	42
La sirena de Cagniard de La Tour.....	43
Las escalas musicales. Los intervalos.....	44
Nota normal y números absolutos de oscilaciones de los sonidos...	45
Los límites de los sonidos perceptibles.....	45
Longitud de onda de los sonidos en el aire.....	46
Preguntas.....	47
Problemas.....	47
Ejercicios prácticos.....	47
Los instrumentos musicales.....	37
Los instrumentos de cuerdas.....	48
Las varillas.....	51
Placas y campanas.....	53
Los tubos sonoros.....	54
Tubos de lengüeta.....	57
Preguntas.....	58
Problemas.....	58
La Resonancia. Resonadores.....	59
Análisis del sonido.....	59
La interferencia de los sonidos.....	62
La voz humana.....	64
Fonógrafo de Edison.....	65
El oído humano.....	66
Preguntas.....	67
Problemas.....	67

## CALOR.

Dilatación.....	68
Termómetros.....	69
Termómetro de máxima y mínima.....	71
Dilatación de los cuerpos sólidos.....	72
Dilatación lineal.....	72
Fuerza de la dilatación.....	75
Péndulo compensador.....	76
Dilatación cúbica.....	75
Dilatación de los cuerpos líquidos.....	78
Anomalia en la dilatación del agua.....	78
Dilatación de los cuerpos gaseosos.....	79
La escala absoluta de temperaturas.....	81
Ley combinada de Mariotte y Gay-Lussac.....	82
Densidad de los gases a cualquiera temperatura y presión....	83
Ecuación de estado de los gases perfectos.....	83
Preguntas.....	86
Problemas.....	86
Ejercicios prácticos.....	87

Cambio de estado de los cuerpos.....	87
Conversión del estado sólido al líquido y viceversa.....	87
Cambio de volumen producido por la fusión.....	90
Influencia de la presión sobre el punto de fusión.....	90
Disolución.....	91
Conversión del estado líquido al gaseoso y viceversa.....	92
Ebullición.....	98
Influencia de la presión exterior sobre el punto de ebullición.....	99
Caldera.....	101
Evaporación.....	102
Fabricación del hielo.....	102
Evaporación del anhídrido carbónico líquido.....	103
Condensación de los vapores.....	104
Condensación o licuación de los gases.....	105
Método de Linde.....	105
Higrimetría.....	107
Higrómetro químico.....	109
Psicrómetro de August.....	110
Preguntas.....	111
Ejercicios prácticos.....	111
Calorimetría.....	112
Cantidad calórica y calor específico.....	112
Determinación del calor específico.....	114
Método de las mezclas de Regnault.....	114
Determinación del calor de fusión.....	116
Determinación del calor de vaporización o condensación.....	117
Problemas.....	118
Ejercicios prácticos.....	119
Fuentes de calor.....	119
Problemas.....	123
Ejercicios prácticos.....	123
Teoría termodinámica.....	124
Transformación del trabajo contra el roce en calor.....	126
El equivalente mecánico del calor.....	127
Transformación del calor en trabajo.....	129
Máquina a vapor.....	129
Rendimiento de la máquina a vapor.....	133
Potencia de una máquina a vapor.....	134
Máquina de expansión.....	135
Motores a explosión.....	136
Rendimiento de un motor a explosión.....	138
Motor Diesel.....	138
Preguntas.....	139
Problemas.....	139
Ejercicios prácticos.....	140
Propagación del calor.....	140
Conductibilidad de los cuerpos sólidos.....	141
Conductibilidad de los cuerpos líquidos.....	143
Conductibilidad de los cuerpos gaseosos.....	144
Preguntas.....	145
Magnetismo.....	147
Imanes naturales y artificiales.....	147
Acción recíproca de los polos.....	148
Imanación por influencia.....	148
Magnetismo latente y libre.....	149
Influencia del calor sobre los imanes.....	150
Métodos de imanación.—Haces magnéticos.....	150
Hipótesis sobre el magnetismo.....	152

	Págs.
Ley de Coulomb.....	155
Campo magnético. Líneas de fuerza.....	157
Relación entre la intensidad del campo magnético y las líneas de fuerza.....	159
Campo magnético homogéneo.....	161
Influencia del hierro dulce sobre la dirección de las líneas de fuerza.....	161
Magnetismo terrestre.....	162
Declinación magnética.....	162
Determinación de la declinación magnética.....	163
Brújula marina o compás marino.....	165
Inclinación magnética.....	166
Determinación de la inclinación.....	167
Intensidad del magnetismo terrestre.....	169
Agujas astáticas.....	169
Cuerpos para- y dia- magnéticos.....	170
Preguntas.....	170
Problemas.....	171
Ejercicios prácticos.....	172

# Física Molecular.

## Introducción.

En la Mecánica hemos considerado los cuerpos como indeformables. Pero en realidad todo cuerpo sufre deformaciones cuando actúan sobre él fuerzas exteriores especialmente si éstas son grandes. La magnitud y la calidad de estas deformaciones depende en gran parte de la constitución íntima del cuerpo y conviene estudiar esta constitución, antes de entrar a ocuparnos de aquellos fenómenos.

La primera experiencia que podemos efectuar es la de la **divisibilidad**: todo cuerpo puede ser dividido en partes cada vez más y más chicas hasta llegar al límite de la percepción. Esta divisibilidad puede llevarnos a dos hipótesis: o el cuerpo es divisible hasta lo infinito o podemos llegar al fin a partículas indivisibles; en otras palabras, la materia puede ocupar el espacio ininterrumpidamente en un solo conjunto, o es una aglomeración de partículas muy pequeñas separadas por pequeños intersticios.

Para resolver esta duda, las teorías modernas han partido de los hechos comprobados en la Química.

El cinabrio es una combinación química de mercurio y azufre que puede descomponerse fácilmente en sus dos componentes; pero ni el mercurio ni el azufre pueden ser a su vez descompuestos y se los considera, por esto, como **elementos**. La proporción exacta de ambos elementos para formar el cinabrio es siempre de 100 [gr] de mercurio por 16 [gr] de azufre; si tomamos 101 [gr] de mercurio o 17 [gr] de azufre, sobrará el gramo de exceso correspondiente. De igual manera 100 [gr] de mercurio se combinan exactamente con 8 [gr] de oxígeno y con 35,5 de cloro. Los elementos se combinan como se ve en proporciones bien determinadas.

El azufre puede formar también con el mercurio otra combinación en que entran 200 [gr] de mercurio por 16 de azufre; igualmente se pueden combinar 200 [gr] de mercurio con 35,5 de cloro. Multiplicando los ejemplos se comprueba que si un elemento puede combinarse con otro en varias proporciones, las cantidades que entran en combinación pueden expresarse como múltiplos de la cantidad menor. Esta ley se llama la **ley de las proporciones definidas** y para

explicarla podemos suponer que cada elemento está formado por partículas pequeñísimas, invariables e indivisibles, los **átomos**, que son distintos para los distintos elementos y cuyas masas están en razón directa a los pesos de combinación correspondientes. Los valores 100 para el mercurio y 16 para el azufre nos dicen que el peso de los átomos de ambos elementos están en la razón 100 : 16; los valores que se deducen de las combinaciones químicas se llaman **pesos atómicos**.

Como los átomos no son perceptibles por procedimiento alguno, su masa verdadera nos es desconocida y los pesos atómicos representan solamente las razones entre sus pesos las que, según la unidad que se elija, pueden ser reemplazadas por otros valores que guarden la misma proporción. En general, se toma la masa de un átomo de oxígeno con valor 16 y resulta para el mercurio el valor 200,5 y para el azufre 32,07.

Al decir que un átomo es indivisible, no queremos decir que lo sea en sentido matemático, puesto que aún contiene cierta cantidad de materia y ocupa cierto espacio aunque muy pequeño. Para formarnos un concepto claro de lo que es esta indivisibilidad, comparemos un ejército con un cuerpo y así como en el primer caso llegamos como unidad indivisible al soldado así llegamos en el segundo al átomo.

Las partículas más pequeñas del cinabrio son un átomo de mercurio y un átomo de azufre y en el sulfuro de mercurio,  $Hg_2S$ , dos átomos de mercurio y un átomo de azufre. Como se ve las partículas de un cuerpo compuesto más pequeñas son grupos de dos o más átomos y se llaman **moléculas**. Si disgregamos una molécula el cuerpo pierde su naturaleza de tal y deja de existir.

A causa de los fenómenos de la alotropía y de otros fenómenos químicos, tenemos que suponer que aún las moléculas de los elementos son agrupaciones de átomos. Se entiende por **alotropía** la propiedad que tienen algunos cuerpos de presentarse en formas diferentes con propiedades distintas, como, por ejemplo, el carbono que aparece en forma de diamante, de grafito y en estado amorfo; lo mismo pasa con el azufre, el selenio, etc. Estas modificaciones alotrópicas de los cuerpos se explican por la suposición de que las moléculas pueden estar formadas por diferente número de átomos.

Según estas consideraciones todo cuerpo está formado en primer lugar por moléculas y éstas a su vez están constituidas por átomos de igual o de distinta naturaleza y pierde su existencia si se disgregan sus moléculas.

El peso de una molécula, llamado **peso molecular**, es igual a la suma de los pesos de los átomos que la componen; el peso molecular del cinabrio es  $200 + 32 = 232$ .

Existen tantas clases de átomos como elementos. Hasta hoy se conocen los siguientes elementos:

Antimonio	Sb	120,2	Europio	Eu	152,0	Nitrógeno	N	14,008
Argón	Ar	39,9	Fluor	F	19,00	Oxígeno	O	16,0
Arsénico	As	74,96	Fósforo	P	31,04	Polonio	Po	210,00
Azufre	S	32,07	Helio	He	4,0	Protartinio	Pr	236,0
Boro	B	10,90	Hidrógeno	H	1,008	Rhenio	Re	98,0
Bromo	Br	79,92	Holmio	Ho	163,5	Selenio	Se	78,6
Carbono	C	12,00	Gadolinio	Gd	157,3	Silicio	Si	28,0
Cloro	Cl	35,46	Kriptón	Kr	82,92	Telurio	Te	125,0
Dysprosio	Dy	162,5	Lutetio	Lu	175,0	Xenón	Xe	127,0
Emanación o Nitón	Nt	222,0	Masurio	Ma	186,0	Yodo	Y	126,53
			Neón	Ne	20,2			
Actinio	Ac	227,0	Indio	In	117,8	Rodio	Rh	102,9
Aluminio	Al	27,1	Iridio	Ir	193,1	Rubidio	Rb	85,5
Bario	Ba	137,4	Lantano	La	139,0	Rutenio	Ru	101,7
Berilio	Be	9,1	Litio	Li	6,49	Samario	Sa	150,4
Bismuto	Bi	209,5	Magnesio	Mg	24,22	Sodio	Na	23,0
Cadmio	Cd	112,4	Manganeso	Mn	54,03	Tántalo	Ta	181,5
Calcio	Ca	44,07	Mercurio	Hg	200,5	Talio	Tl	204,0
Cerio	Ce	140,25	Molibdeno	Mo	96,0	Torio	Th	232,1
Cesio	Cs	132,5	Neodimio	Nd	144,3	Terbio	Tb	159,2
Cromo	Cr	52,0	Niquel	Ni	58,68	Titano	Ti	48,1
Cobalto	Co	58,97	Niobio	Nb	93,5	Tulio	Tu	169,4
Cobre	Cu	63,57	Oro	Au	197,2	Uranio	U	238,4
Erbio	Er	167,7	Osmio	Os	190,3	Vanadio	V	51,0
Escandio	Sc	45,1	Paladio	Pd	106,7	Wolfram	W	184,0
Estaño	Sn	118,7	Plata	Ag	107,88	Yterbio	Yb	173,5
Estroncio	Sr	87,6	Platino	Pt	199,2	Ytrio	Y	88,7
Galio	Ga	69,5	Plomo	Pb	207,2	Zinc	Zn	65,37
Germanio	Ge	72,5	Potasio	K	39,00	Zirconio	Zr	90,6
Hafirio	Hf	175,1	Praseodimio	Pr	140,9			
Hierro	Fe	55,84	Radio	Ra	225,0			

Las últimas investigaciones sobre la constitución de la materia, basadas en experimentos que estudiaremos en la electricidad y óptica, hacen suponer que los átomos no son elementos sencillos sino que representan verdaderos sistemas planetarios en que alrededor de un núcleo cargado de electricidad positiva giran en varios círculos masas eléctricas negativas, llamadas electrones.

### Fuerzas moleculares.

Con la suposición de que las moléculas son invariables está íntimamente ligada la otra de que ellas no se tocan, sino que están separadas por intersticios, puesto que sólo así se explica la variación del volumen por una fuerza exterior. A causa de una tracción las moléculas se separan y de una compresión se juntan, ocupando el total de las moléculas un espacio mayor ó menor, y como las partículas no están unidas, es claro que deben actuar entre ellas fuerzas que impiden su separación y su acercamiento: estas fuerzas se lla-

man **fuerzas moleculares** y su valor disminuye rápidamente con la distancia; es ya insignificante a una distancia muy pequeña, que según **Quincke** es de 0,000050 mm. Construyendo alrededor de una molécula una esfera con radio de 0,000050 mm, limitamos por ella el espacio dentro del cual actúan las fuerzas moleculares; esta esfera se llama por este motivo **esfera de actividad molecular**.

Hay que distinguir dos clases de fuerzas moleculares: una que se opone a la separación de las moléculas, la **cohesión**, y otra que se opone al acercamiento de ellas, la **expansión**.

Cuando el cuerpo está en su estado normal, las dos fuerzas están en equilibrio; acercándose las moléculas aumentan las dos, pero más la expansión, lo que hace volver el cuerpo a su estado normal después de haber quitado la fuerza exterior, y, al contrario, alejándose disminuyen las dos fuerzas, pero más la expansión, de modo que siendo mayor la cohesión, puede hacer volver las partículas a la posición normal.

Si partimos un cuerpo, por lo general no es posible pegar los dos pedazos por simple contacto, porque no podemos acercarlos tanto que las fuerzas moleculares adquieran un valor apreciable; pero, puliendo las caras de los trozos, de modo que tenga lugar un acercamiento muy grande entre muchas moléculas pueden actuar nuevamente las fuerzas moleculares y cuesta mucho separarlos.

La fuerza atractiva que actúa entre las partículas de un mismo cuerpo se llama **cohesión** y la que actúa entre partículas de dos cuerpos, que también pueden ser de la misma naturaleza, **adhesión**.

De la misma manera que entre las moléculas, existen también entre los átomos fuerzas atractivas que toman el nombre de **afinidad**.

Cuando todas las fuerzas moleculares están en equilibrio, el cuerpo se encuentra en su estado normal y posee su forma normal; pero cuando salen las moléculas de su posición de equilibrio por una fuerza exterior, las fuerzas moleculares se oponen a este movimiento y se establece equilibrio entre ambas y las últimas hacen volver el cuerpo a su estado normal cuando quitamos la fuerza exterior. Esta propiedad de los cuerpos de poder volver a su estado normal, se llama **elasticidad**.

## Cuerpos sólidos.

### Elasticidad.

La elasticidad de los cuerpos sólidos subsiste mientras la carga exterior no pase de cierto valor; tal carga se denomina **carga límite de elasticidad** y la designaremos en lo sucesivo por  $F_l$ . Si pasamos de este límite, el cuerpo no recupera su estado inicial y sufre una **deformación permanente**; decimos entonces que hemos pasado el

**límite de la elasticidad perfecta.** No siendo posible determinar ese límite con toda exactitud se ha convenido en tomar por tal la carga que produce una deformación permanente de 0,03% de la longitud inicial. En un alambre de un metro de largo su alargamiento permanente no debe pasar de 0,03 [cm].

Si se sigue aumentando la carga más allá de ese límite las moléculas se alejarán tanto las unas de las otras que dejarán de actuar las fuerzas moleculares y se producirá la ruptura del cuerpo. El valor de este esfuerzo capaz de producir tal ruptura se denomina **carga de ruptura** y la designaremos por  $F_r$ .

Es necesario el conocimiento de los valores de  $F_l$  y  $F_r$  a fin de no hacer actuar sobre los distintos elementos de una construcción esfuerzos capaces de producir deformaciones permanentes y evitar por completo esfuerzos que puedan llegar a producir la ruptura del material. Como es lógico, en la práctica no solamente se evita de llegar a los valores enunciados sino que hay que quedar muy lejos de ellos, consultando así la mayor seguridad posible. Conociendo pues para un material determinado el valor de  $F_r$ , se lo divide por un coeficiente  $s$ , llamado **grado de seguridad**, para obtener la **carga máxima admisible**,  $F_m$ , de modo que  $F_m = \frac{F_r}{s}$ .

El grado de seguridad depende de la clase de material que se emplee y se hace, por ejemplo,  $s=5$  para los metales,  $s=10$  para las maderas y  $s=20$  para los ladrillos.

También depende el valor de  $s$  de la naturaleza de los esfuerzos que deba soportar el material y debe ser mayor si ellos actúan bruscamente y se producen vibraciones.

Las deformaciones pueden ser de diferentes especies y reciben los nombres de alargamiento, acortamiento, deslizamiento, flexión y torsión según que el cuerpo esté sometido a esfuerzos de tracción, compresión, cizalle, flexión o torsión. Se llama esfuerzo de cizalle o esfuerzo cortante aquel que, actuando en el plano de una sección transversal, tiende a cortar en dos partes al sólido, como es el caso de un remache que une dos planchas que tienden a deslizarse la una sobre la otra bajo la acción de dos fuerzas.

Nosotros estudiaremos con más detalles la tracción, la compresión y la torsión.

### Tracción.

**1. Experimento:** Colguemos un alambre de cobre de un metro de largo y  $\frac{1}{2}$  mm de diámetro que sostenga un platillo en su extremo inferior; marquemos dos puntos  $A$  y  $B$  (Fig. 1), coloquemos en el platillo una pesa de 3 [kg-m] y midamos la nueva distancia entre los puntos  $A'$  y  $B'$ ; cambiemos después el alambre de cobre por otros de hierro o aluminio y repitamos la experiencia.

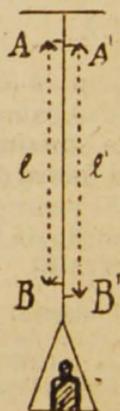


Fig. 1

La longitud  $A'B'$  es mayor que  $AB$ ; el alambre ha sufrido un alargamiento que resulta distinto para los diferentes alambres a pesar de actuar la misma fuerza.

**El alargamiento que produce una tracción sobre un alambre depende de la naturaleza del alambre.**

**2. Experimento:** Repitamos el experimento anterior pero tomando: 1) alambres de la misma substancia pero de largos diferentes; 2) lo mismo con alambres de diferentes secciones; 3) sometiendo un mismo alambre a diferentes tracciones.

**El alargamiento que se produce en los alambres es directamente proporcional a su longitud y a la fuerza de tracción e inversamente proporcional a su sección.**

Conocidas estas relaciones, podemos formular la **ley de Hooke** que nos permite calcular el alargamiento de cualquier alambre a causa de una tracción de  $F$  [kg-p]. Supongamos para ello que un alambre de 1 [cm] de largo, 1 [cm<sup>2</sup>] de sección sometido a la tracción de 1 [kg-p] sufre un alargamiento  $\epsilon$ . Resultará:

longitud	sección	fuerza	alargamiento
1 [cm]	1 [cm <sup>2</sup> ]	1 [kg-p]	$\epsilon$ [cm]
$l$ »	1 »	1 »	$\epsilon l$ »
$l$ »	$q$ »	1 »	$\frac{\epsilon l}{q}$ »
$l$ »	$q$ »	$F$ »	$\frac{\epsilon l F}{q}$ »

Designando el alargamiento total por  $\lambda$ , nos resulta:

$$(1) \quad \lambda = \frac{\epsilon l F}{q} \text{ [cm].}$$

ecuación de la ley de **Hooke**.

$\epsilon$  se llama **coeficiente de elasticidad** y nos indica el **alargamiento que experimenta un alambre de 1 [cm] de largo, 1 [cm<sup>2</sup>] de sección por la fuerza de 1 [kg-p]**.

El valor de  $\epsilon$  para el fierro fundido es de 0,000001; para el fierro batido de 0,0000005; para el acero de 0,00000046; para la madera de 0,000010.

**Problema:** ¿Qué alargamiento produce una fuerza de 20 [kg-p] en un alambre de cobre de 5 [m] de largo y de 2 [mm] de diámetro si su coeficiente de elasticidad es de 0,000008?

Para aplicar la fórmula necesitamos conocer el valor de  $q$ .

$$q = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 0,1^2 = 0,0314 \text{ [cm}^2\text{].}$$

$$\lambda = \frac{\epsilon \cdot l \cdot F}{q} = \frac{0,000008 \cdot 500 \cdot 20}{0,0314} = 2,55 \text{ [cm].}$$

Cuando se trata de una columna de bastante peso, en vez de un alambre, es claro que el peso de la parte inferior actúa sobre la superior aumentando el valor de  $F$  y resulta, si se designa por  $mg$  el peso de la columna:

$$(2) \quad \lambda = \frac{\varepsilon \cdot l}{q} \left( F + \frac{mg}{2} \right).$$

**Problema:** De una columna de fierro batido de 40 [cm<sup>2</sup>] de sección y de 2 [m] de largo está suspendida una masa de 25000 [kg]. ¿Cuál es el alargamiento que se produce si la densidad del fierro es 7,2  $\left[ \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$ ?

Calculamos primero la masa de la columna:

$$m = 40 \cdot 200 \cdot 7,2 \text{ [gr]} = 57,6 \text{ [kg-m]}.$$

$$\lambda = \frac{0,0000005 \cdot 200}{40} \left( 25000 + \frac{57,6}{2} \right) = 0,0625 \text{ [cm]}.$$

¿Cuál es la carga máxima con que podemos actuar sobre un alambre de sección  $q$ ?

Sabemos que sobre cada [cm<sup>2</sup>] de sección podemos actuar con la carga máxima admisible  $F_{mt}$  y sobre una sección de  $q$  [cm<sup>2</sup>] podremos hacer actuar la fuerza

$$(3) \quad F = q \cdot F_{mt},$$

ecuación que se denomina **ecuación de resistencia para la tracción**.

El valor de  $F_{mt}$  para el fierro fundido es de 250  $\left[ \frac{\text{kg-p}}{\text{cm}^2} \right]$ ; para el acero de 1200  $\left[ \frac{\text{kg-p}}{\text{cm}^2} \right]$ ; para la madera de 100  $\left[ \frac{\text{kg-p}}{\text{cm}^2} \right]$ .

**Problema:** ¿Qué sección debemos darle a una barra que debe soportar un esfuerzo de tracción de 4600 [kg-p] si  $F_{mt} = 800 \left[ \frac{\text{kg-p}}{\text{cm}^2} \right]$ ?

$$F = q \cdot F_{mt}$$

$$q = \frac{F}{F_{mt}} = \frac{4600}{800} = 5,75 \text{ [cm}^2\text{]}.$$

**Problema:** ¿Qué diámetro hay que darle al fierro de los eslabones de una cadena que debe soportar una fuerza de 4000 [kg-p] si  $F_{mt} = 800 \left[ \frac{\text{kg-p}}{\text{cm}^2} \right]$ ?

Como cada eslabón de la cadena tiene dos secciones que soportan la carga, resulta:

$$F = 2q \cdot F_{mt}$$

$$q = \frac{F}{2F_{mt}} = \frac{4000}{2 \cdot 800} = 2,5 \text{ [cm}^2\text{]}.$$

$$q = \frac{d\pi^2}{4} = 2,5 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$d = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 4}{3,14}} = 1,7 \text{ [cm]}.$$

## Compresión.

Si en vez de una tracción ejercemos sobre un cuerpo una compresión, ésta producirá un acortamiento del cuerpo en la dirección en que actúa la fuerza; para este acortamiento rigen las mismas relaciones que para el alargamiento que produce la tracción. Podemos emplear, por consiguiente, las mismas fórmulas anteriores sin otro cambio que el de precederlas del signo negativo:

$$\lambda = - \frac{\varepsilon \cdot l \cdot F}{q}$$

$$\lambda = - \frac{\varepsilon \cdot l}{q} \left( F + \frac{mg}{2} \right).$$

También en este caso existe una carga máxima admisible de compresión  $F_{mc}$  con la que podemos actuar sobre cada  $[\text{cm}^2]$  de sección, de modo que sobre una columna de sección de  $q [\text{cm}^2]$  el esfuerzo de compresión será  $F = q \cdot F_{mc}$ ; esta ecuación se denomina **ecuación de resistencia para la compresión**.

El valor de  $F_{mc}$  para el fierro fundido es de  $500 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{p}}{\text{cm}^2} \right]$ ; para el fierro batido de  $1000 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{p}}{\text{cm}^2} \right]$ ; para el acero de  $1200 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{p}}{\text{cm}^2} \right]$ ; para la madera de  $60 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{p}}{\text{cm}^2} \right]$  y para el ladrillo de  $8 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{p}}{\text{cm}^2} \right]$ .

**Problema:** ¿Qué carga puede soportar una columna de ladrillos de sección cuadrada cuya arista es de  $1\frac{1}{2}$  ladrillos y  $F_{mc} = 8 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{p}}{\text{cm}^2} \right]$ ?

Un ladrillo corriente tiene las dimensiones  $25 \times 12 \times 6,5$  [cm]; si la capa de mezcla es de 1 [cm], un lado de la sección será de  $25 + 1 + 12,5 = 38,5$  [cm] y la sección será  $q = 1482,25$  [cm<sup>2</sup>].

Finalmente  $F = q \cdot F_{mc} = 1482,25 \cdot 8 = 11858$  [kg-p].

La proporcionalidad que existe entre el alargamiento o el acortamiento de un alambre y la fuerza que lo produce, rige también para los alambres arrollados en forma de una hélice; esta propiedad es la que nos permite la construcción de los dinamómetros que hemos estudiado en la Mecánica.

Hasta este momento hemos tomado en cuenta solamente la deformación que sufre un cuerpo en la dirección misma en que actúa la fuerza, sin preocuparnos de la de la sección perpendicular a la anterior.

**3. Experimento:** Dibujemos sobre una lámina de goma sostenida entre dos listones, un cuadrado; colguémosla por uno de los listones y suspendamos en el otro un cuerpo pesado. Observemos el cuadrado.

El cuadrado ha perdido su forma y se ha convertido en un rectángulo cuyo lado horizontal es menor que el vertical, y éste mayor que el lado del cuadrado primitivo, mientras que el horizontal menor que el mismo. La sección se ha contraído.

Si se repite la experiencia sometiendo un prisma de goma a una compresión se comprueba que su sección aumenta.

### Torsión.

Si sobre un alambre hacemos actuar un momento estático que tienda a torcerlo, éste se tuerce hasta llegar a cierto ángulo  $\alpha$  y queda entonces en equilibrio. Como un momento no puede equilibrarse sino por otro momento estático igual y contrario, tenemos que suponer que en el interior del alambre se habrá formado tal momento que denominamos **momento de torsión**.

Experimentalmente se comprueba que el ángulo de torsión  $\alpha$  para un alambre determinado de longitud  $l$  y radio  $r$  sobre el cual actúa un momento estático  $F \cdot s$ , es:

$$\alpha = c \cdot \frac{F \cdot s \cdot l}{r^4}.$$

$c$  se denomina **coeficiente de torsión**. Si le damos a  $F \cdot s$ , a  $l$  y a  $r$  valores de una unidad absoluta a cada una ( $F \cdot s = 1 \left[ \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}^2}{\text{seg}^2} \right]$ ,  $l = 1$  [cm] y  $r = 1$  [cm]), resulta  $c = \alpha$ , lo que nos da la siguiente definición para el coeficiente de torsión:

**El coeficiente de torsión nos indica el valor del ángulo en que se tuerce el extremo de un alambre de 1 [cm] de largo y 1 [cm] de radio si sobre él actúa una unidad absoluta de momento estático.**

Despejando el valor del momento  $F \cdot s$  de la ecuación anterior, obtenemos:

$$F \cdot s = \frac{r^4}{c \cdot l} \cdot \alpha.$$

La expresión  $\frac{r^4}{c \cdot l} \cdot \alpha$  representa el momento estático interior, es decir, el momento de torsión y vemos que, para un mismo alambre depende solamente del valor del ángulo  $\alpha$ . Si en este caso dejamos actuar sucesivamente dos momentos producidos por dos fuerzas distintas  $F_1$  y  $F_2$  con un mismo brazo  $s$ , resulta:

$$F_1 \cdot s = \frac{r^4}{c \cdot l} \cdot \alpha_1$$

$$F_2 \cdot s = \frac{r^4}{c \cdot l} \cdot \alpha_2$$

---


$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$$

Las dos fuerzas que han actuado sobre el alambre son directamente proporcionales a los ángulos de torsión resultantes.

Midiendo los dos ángulos de torsión y conociendo una de las fuerzas, podemos determinar la otra fuerza:

$$(4) \quad F_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot F_1.$$

Esta relación tan sencilla encuentra numerosas aplicaciones muchas de las cuales conoceremos al estudiar otros capítulos.

## Cuerpos líquidos.

### Compresibilidad.

Para estudiar la compresibilidad de los cuerpos líquidos se emplea el **piezómetro**.

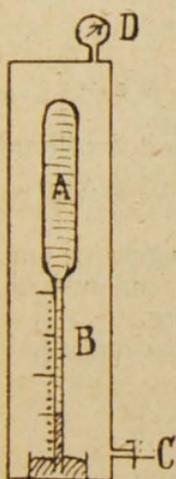


Fig. 2

El líquido cuya compresibilidad nos interesa conocer se encierra en un vaso especial *A* (fig. 2) que termina por abajo en un tubo capilar graduado; el volumen *V* del líquido encerrado debe conocerse. El extremo inferior del tubo capilar se encuentra sumergido en mercurio.

Todo lo anterior está colocado dentro de una campana resistente de vidrio, *B*, llena de agua y que puede comunicarse por medio de un tubo *C* con una máquina de compresión. Un manómetro *D* permite medir la presión *p* en atmósferas a que se someta el líquido.

La graduación del tubo capilar nos permite medir la reducción del volumen que experimenta.

Designemos por *c* la reducción de volumen que experimenta 1 [cm<sup>3</sup>] de líquido por cada atmósfera de presión.

Un aumento de presión de 1 [atm]	reduce 1 [cm <sup>3</sup> ]	en	<i>c</i>
» » » » » <i>p</i>	» » » » » 1	» » » » »	<i>p · c</i>
» » » » » <i>p</i>	» » » » » <i>V</i>	» » » » »	<i>V · p · c</i>

Designando esta reducción de volumen por *v* obtenemos:

$$v = V \cdot p \cdot c$$

$$(5) \quad c = \frac{v}{V \cdot p}$$

El valor de  $c$  se denomina **coeficiente de compresibilidad** e indica la **reducción de volumen que experimenta cada [cm<sup>3</sup>] de líquido por un aumento de presión de 1 [atm]**.

El coeficiente de compresibilidad del alcohol es 0,000080, del agua 0,000050, del mercurio 0,000003.

## **Adhesión entre cuerpos sólidos y líquidos.**

Ya hemos dicho que también entre las moléculas de cuerpos diferentes en contacto actúa una fuerza especial, la **adhesión**, variable según la naturaleza de dichos cuerpos.

Si se introduce un cuerpo sólido en un líquido y se retira después, puede quedar mojado o no. Es evidente que, si resulta mojado, la adhesión entre el sólido y el líquido es mayor que la cohesión entre las moléculas del líquido; si sale seco, lo contrario.

Una barra de fierro se moja al introducirse en agua y sale seca si la introducimos en mercurio, lo que nos dice que la adhesión entre el fierro y el agua es mayor que la cohesión del agua y que la adhesión entre el fierro y el mercurio es menor que la cohesión del mercurio. El cobre se moja tanto en contacto con el agua como con el mercurio y en este líquido llega aún a disolverse.

Parece pues que la solubilidad de los cuerpos depende, entre otras causas, de la relación entre la adhesión y la cohesión.

A veces es fácil medir la adhesión entre un sólido y un líquido y otras la cohesión del líquido.

Colguemos de un platillo de una balanza un disco horizontal de vidrio, por ejemplo, equilibrémoslo con una tara en el otro platillo; coloquemos en seguida un vaso con agua de tal modo que ésta llegue a tocar justamente el disco; para separar el disco del agua podemos cargar con pesas cuidadosamente el otro platillo hasta que se produzca el desprendimiento. Es claro que las pesas nos miden la fuerza de cohesión del agua, puesto que el disco sale mojado en su cara inferior y las moléculas del agua se han separado las unas de las otras.

Si repetimos la experiencia anterior reemplazando el agua por mercurio, necesitamos también de cierta fuerza bien apreciable, pero como el disco resulta seco, habremos medido la fuerza de la adhesión, entre el vidrio y el mercurio.

## **Presión de cohesión o tensión superficial.**

Sabemos que la fuerza de cohesión que actúa entre las moléculas de un líquido es recíproca. Una molécula atrae a todas las otras que se encuentran dentro de la esfera de actividad molecular y, al revés, todas esas moléculas atraen a la central.

El radio de la esfera de actividad molecular es muy pequeño, alrededor de unos 0,000050 mm; sin embargo dentro de dicha esfera caben una inmensa cantidad de moléculas.

Supongamos que  $AB$  sea la superficie de un líquido (fig. 3). Consideremos a una molécula  $m_1$  en su interior. Es claro que la re-

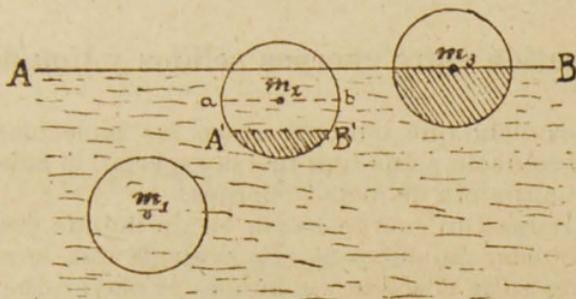


Fig. 3

sultante de las fuerzas atractivas de todas las moléculas que caben dentro de la esfera de actividad molecular es nula, a causa de la repartición simétrica de las moléculas.

Otra molécula  $m_2$  se encuentra a menor distancia de la superficie que el radio de que hablamos. Tracemos por su centro un plano  $ab$  paralelo a la superficie y el plano simétrico  $A'B'$  de la superficie con respecto a éste plano. La acción de todas las moléculas comprendidas dentro de la esfera entre los planos  $AB$  y  $A'B'$  es nula por la misma razón anterior; pero restan las moléculas comprendidas dentro del segmento esférico inferior ejerciendo acción, la que no está compensada hacia arriba, y darán una resultante que actúa normalmente a la superficie  $AB$  hacia el interior del líquido.

Si la molécula  $m_3$  está situada en la superficie misma del líquido, la totalidad de las moléculas comprendidas dentro del hemisferio inferior ejercen una fuerza, no compensada hacia arriba, y darán la resultante máxima hacia el interior.

Todas las moléculas comprendidas dentro de la capa superficial cuyo espesor es del radio de la actividad molecular están sometidas a fuerzas que actúan hacia el interior del líquido y dan origen a una presión que se denomina **presión de cohesión o tensión superficial**.

El valor de esta tensión superficial depende de la naturaleza del líquido y tiene un valor fijo para cada uno.

Es fácil comprobar que la forma de la superficie, convexa o cóncava, hace variar el valor de la tensión superficial.

Contemplemos el caso de una superficie líquida cóncava  $AB$  (fig. 4, I) y, para mayor claridad, una molécula  $m$  situada cerca de la superficie y no en la superficie misma. Dibujemos la esfera de actividad molecular. Si la superficie hubiera sido plana  $A_1B_1$  la tensión superficial tendría el valor  $K$ ; tracemos por el centro de la es-

fera el plano  $ab$  paralelo a  $A_1B_1$  y las superficies simétricas  $A'B'$  y  $A'_1B'_1$ . Si la superficie del líquido hubiera sido plana,  $A_1B_1$ , la presión habría sido  $K$ , producida por las moléculas del segmento de esfera inferior al plano  $A'_1B'_1$ ; pero como la superficie es convexa  $AB$ , quedan sin compensación las moléculas debajo de la superficie curva  $A'B'$ , que son más numerosas que antes y la tensión superficial resulta mayor. Si la superficie hubiera sido de menor radio de curvatura el aumento de la presión habría sido mayor aún como se deduce fácilmente de la figura.

Supongamos ahora que el radio de curvatura fuera de 1 [cm],

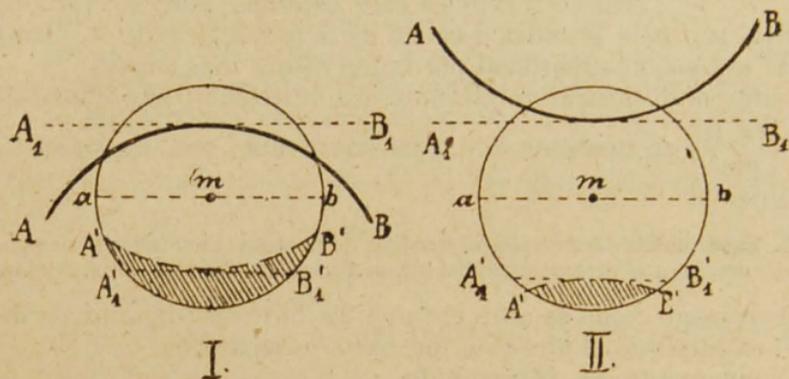


Fig. 4

el aumento de la tensión con respecto al plano sea  $H$ , para un radio de  $r$  [cm] aumentaría en  $\frac{H}{r}$  y la tensión final sería  $K_1 = K + \frac{H}{r}$ .

Análogamente resulta para una superficie cóncava una presión

$$K_2 = K - \frac{H}{r}.$$

Véase al respecto la fig. 4, II. La tensión superficial es, por consiguiente, menor que la que corresponde a la superficie plana si es cóncava y tanto menor cuanto menor sea su radio de curvatura.

Muchos son los fenómenos que pueden explicarse por medio de la tensión superficial y de sus cambios según la forma de la superficie líquida.

**4. Experimento:** Preparemos una disolución de alcohol en agua de igual densidad a cierto aceite. Echemos, por medio de una pipeta, una porción de aceite al interior de la disolución y quitemos la pipeta. Veamos qué forma toma la gota de aceite.

El aceite toma siempre la forma esférica.

La influencia de la gravedad está anulada porque el peso de la gota y el empuje que actúa sobre ella son iguales. No quedan actuando sino las fuerzas moleculares.

Supongamos que al quitar la pipeta la gota tuviera una forma irregular (fig. 5). La tensión superficial será distinta en los distintos puntos de su superficie de acuerdo con su curvatura. No puede existir equilibrio y las moléculas del aceite se pondrán en movimiento a causa de las diferentes presiones; el equilibrio se restablecerá solamente cuando la curvatura sea igual en todos sus puntos lo que sucede si la forma es esférica.

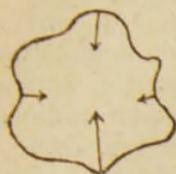


Fig. 5

Un fenómeno análogo se produce cuando cae mercurio sobre una mesa; si las gotas son muy chicas su forma es casi esférica, pero se van deformando si son más grandes a causa de la pesantez y de la disminución de la tensión superficial por la curvatura más suave.

Como dato ilustrativo diremos que la tensión superficial llega a  $1.5 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{p}}{\text{cm}^2} \right]$  en una gota de agua cuyo radio sea de 0,001 [mm] (una micra).

**5. Experimento:** Formemos al extremo de un tubo una burbuja de agua jabonosa y cerremos el otro extremo del tubo. Abrámoslo después. ¿Qué se observa?

Tan luego como se abre el tubo, la burbuja disminuye de tamaño, expulsando el aire interior, hasta desaparecer.

Nuevamente ha intervenido la tensión superficial.

Sea  $AB$  un corte muy exagerado de una parte de la burbuja (fig. 6). En la parte exterior la superficie es convexa y la tensión tendrá allí el valor  $K_1 = K + \frac{H}{r}$ ; al

interior la tensión será  $K_2 = K - \frac{H}{r}$

forzosamente menor que la anterior; la diferencia entre ambas es

$K_1 - K_2 = \left( K + \frac{H}{r} \right) - \left( K - \frac{H}{r} \right) = 2 \frac{H}{r}$  y es ella la que obliga a disminuir el tamaño de la burbuja, expulsando el aire interior.

Para que, con tubo abierto, hubiera equilibrio sería indispensable que

$$K + \frac{H}{r} = K - \frac{H}{r}$$

lo que sucederá para un radio  $r = \infty$ , es decir si la superficie llegara a ser plana.

¿Cuál será la condición de equilibrio si el tubo se mantiene cerrado?

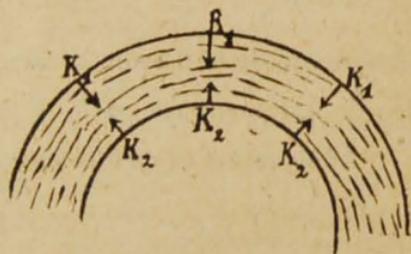


Fig. 6

## Forma de la superficie líquida en contacto con un sólido.

**6. Experimento:** Introduzcamos una parte de una varilla o de una placa de vidrio en agua y observemos la superficie del agua en la vecindad del sólido. Repitamos la experiencia con mercurio en vez de agua.

El agua se levanta alrededor del vidrio; el mercurio desciende; en ambos casos la superficie es curva.

Para explicar este fenómeno entremos a estudiar las acciones moleculares sobre una partícula líquida  $O$  en el punto preciso en que la superficie líquida toque al cuerpo sólido (fig. 7).

Dibujemos alrededor de  $O$  la esfera de actividad molecular. Las moléculas del cuerpo sólido contenidas en el hemisferio izquierdo nos darán por su atracción molecular una fuerza resultante  $A$ , debida a la adhesión. Las del líquido incluidas en el medio hemisferio derecho inferior, la fuerza  $K$  debida a la cohesión del líquido (fig. 7).

La relación entre  $A$  y  $K$  depende de la relación entre las fuerzas de adhesión entre las moléculas del sólido con respecto al líquido y de la cohesión del líquido.

Supongamos que la adhesión sea mucho mayor que la cohesión

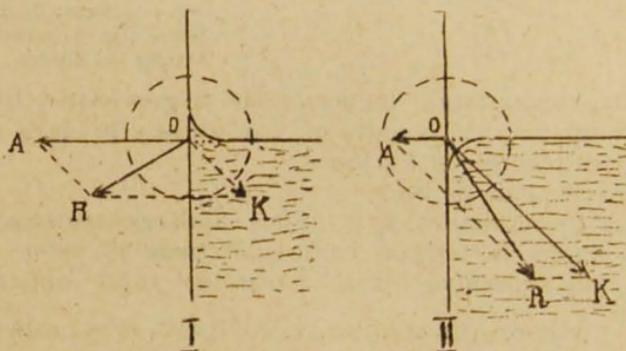


Fig. 7

(el líquido moja al sólido), será  $A > K$  (fig. 7, I). Componemos ambas fuerzas y obtenemos la resultante  $R$ ; el líquido debe ponerse normal a  $R$  y se produce una elevación del líquido.

Si la cohesión es mayor que la adhesión (el líquido no moja al sólido), será  $A < K$  y la resultante  $R$  caerá dentro del líquido (fig. 7, II). Este quedará en equilibrio si su superficie es normal a  $R$  y el líquido sufrirá una depresión.

Ejemplo del primer caso es el de agua en contacto con vidrio y del segundo el mercurio en contacto con vidrio.

Los valores de  $A$  y de  $K$  permanecen constantes para el mismo par de cuerpos (sólido y líquido) y siempre el ángulo que forma el líquido al contacto será el mismo.

## Capilaridad.

Sabido lo anterior, veamos lo que sucede si un líquido se encuentra en un tubo capilar (sección interior muy pequeña).

Si el tubo es de gran sección las curvaturas producidas en el líquido en los lados opuestos interiores, no alcanzan a juntarse y la superficie líquida central permanece plana (fig. 8); por el contrario, si el tubo es suficientemente estrecho, las curvaturas de los lados opuestos se juntan produciendo, según el caso, una superficie cóncava si el líquido moja al tubo (**menisco cóncavo**) y una superficie convexa si no lo moja (**menisco convexo**).

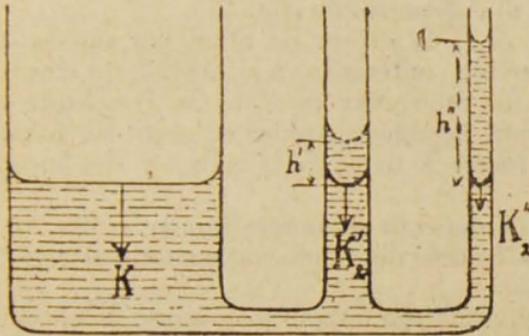


Fig. 8

opuestos se juntan produciendo, según el caso, una superficie cóncava si el líquido moja al tubo (**menisco cóncavo**) y una superficie convexa si no lo moja (**menisco convexo**).

**7. Experimento:** Echemosle agua (de preferencia coloreada) al grupo de vasos comunicantes formados por uno suficientemente ancho para que su superficie sea plana y los otros capilares de distintas secciones (fig. 8) y observemos los niveles del líquido.

El agua, contrariando la acción de la gravedad y las leyes de los vasos comunicantes, se eleva en los tubos y se eleva tanto más cuanto más estrechos son los tubos.

Veamos la razón de ésto.

El agua forma dentro de los tubos capilares meniscos cóncavos. En el tubo ancho la tensión superficial tiene el valor  $K$ , correspondiente a la superficie plana; dentro del tubo capilar el valor

$K_2 = K - \frac{H}{r}$ , menor que la anterior; el líquido sube hasta la altura  $h$

empujado por la diferencia de ambas presiones y queda en equilibrio tan luego como la presión  $hdg$  de la columna líquida sea igual a la diferencia aludida:

$$K - \left( K - \frac{H}{r} \right) = hdg$$

de donde resulta  $h = \frac{H}{dgr}$ .

Para un mismo líquido y tubos de igual substancia y de igual sección, la elevación será siempre la misma.

Pero si la sección de tales tubos es distinta, cuanto menor sea el radio interior  $r$ , tanto mayor resultará la elevación  $h$ .

En tubos demasiado estrechos el líquido sube a alturas considerables; en tubos de un radio de 0,01 [mm] el agua sube hasta 150 [cm] de altura.

**8. Experimento:** Introduzcamos un tubo capilar en agua, saquémoslo después y coloquémoslo verticalmente. ¿Cae toda el agua debido a la pesantez?

Siempre queda dentro del tubo una columna  $h$  de agua invariable cuantas veces repitamos la experiencia.

La superficie superior del agua tiene la forma cóncava (fig. 9) y allí la tensión superficial es  $K_2 = K - \frac{H}{r}$ ; en el extremo inferior se

forma una gota de forma convexa con tensión  $K_1 = K + \frac{H}{r}$ . La diferencia de ambas tensiones sostiene la columna  $h$ :

$$\left(K + \frac{H}{r}\right) - \left(K - \frac{H}{r}\right) = hdg$$

$$2 \frac{H}{r} = hdg$$

$$h = \frac{2H}{dgr}$$

Esta ecuación se presta para determinar el valor de  $H$ .

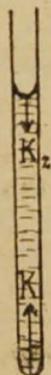


Fig. 9

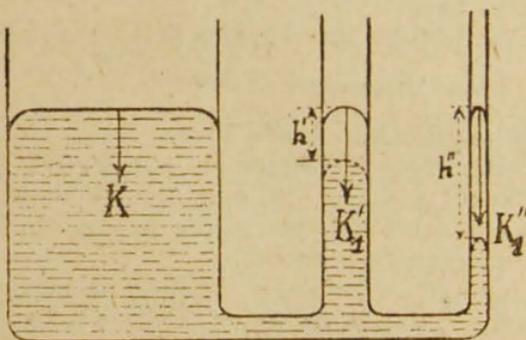


Fig. 10

**9. Experimento:** Repitamos el experimento 7, pero echándole ahora mercurio a los vasos y observemos los niveles (fig. 10).

El nivel del mercurio en los tubos capilares es más bajo que en el tubo ancho y cada vez más inferior cuanto más finos sean los tubos.

En el tubo ancho en que la superficie central del mercurio es plana la tensión superficial es  $K$ ; pero en los capilares es mayor a causa de la formación en ellos de un menisco convexo,  $K_1 = K + \frac{H}{r}$ ; el

desnivel  $h$  produce la presión  $hdg$  que equilibra a la diferencia de las tensiones superficiales:

$$\left( \bar{\kappa} \div \frac{H}{r} \right) - K = hdg$$

$$h = \frac{H}{dgr}$$

Esta ecuación nos permite explicar por qué, cuanto menor sea el radio interior del tubo tanto más tiene que descender el nivel del mercurio. Además se prestan las 3 ecuaciones, obtenidas para  $h$ , para determinar la constante de capilaridad  $H$ .

**10. Experimento:** Coloquemos cuidadosamente algunas agujas delgadas, bien limpias las unas y un poco engrasadas las otras, sobre la superficie del agua y veamos lo que sucede.

Las agujas limpias se van al fondo del vaso a causa de la pesantez (peso mayor que empuje); las otras se mantienen a flote, a pesar de que su peso es igual al de las otras. ¿Por qué?

Las agujas engrasadas no se mojan por el agua y debajo de ellas se forma una superficie cóncava. En la superficie plana la tensión superficial es  $K$  y debajo de las agujas es  $K_2 = K - \frac{H}{r}$ ; la diferencia  $\frac{H}{r}$  de ellas debe ser mayor que la presión que produce la aguja por su peso.

Si la aguja tiene un diámetro demasiado grande se irá siempre al fondo porque disminuye el valor de  $\frac{H}{r}$ .

Igual explicación puede darse del por qué algunos insectos pueden correr sobre las aguas sin sumergirse; sus patas trasudan una substancia aceitosa que evita que se mojen por el agua. Si se elimina dicha substancia por medio de un disolvente, por ejemplo, éter, se sumergen de inmediato.

Los fenómenos capilares explican la elevación de los líquidos por la mecha de las lámparas, la absorción de agua por las esponjas, azúcar y muchos otros.

### Disoluciones.

Decimos que un cuerpo sólido se disuelve en un líquido si sus moléculas se separan para repartirse homogéneamente dentro del líquido, perdiendo así su estado sólido.

La disolución se produce cuando la fuerza atractiva entre las moléculas del sólido y del líquido, la adhesión, es mayor que la cohesión del sólido.

Una cantidad determinada de líquido no puede disolver sino

hasta una cantidad determinada del cuerpo sólido, y en tal momento se dice que se ha producido la **saturación**.

Se puede apresurar la disolución del sólido revolviendo el líquido y calentándolo. Al revolver el líquido quitamos la capa líquida pronta a saturarse y ponemos al sólido en contacto con el resto del líquido no saturado; al calentarlo disminuimos la cohesión del sólido porque se alejan mutuamente sus moléculas.

Si la cohesión del sólido es mayor que la adhesión entre el sólido y el líquido, la substancia es insoluble.

También se produce la disolución de un líquido en otro, pero en este caso se pueden producir fenómenos distintos. El alcohol es soluble en el agua en cualquiera proporción: no se produce la saturación.

Si se trata de agua y éter, se llega a producir una solución saturada de éter en agua y otra de agua en éter.

El agua y el aceite son insolubles el uno en el otro porque la cohesión de ambos es mayor que la adhesión de los dos líquidos. Si en un tubo de ensayo batimos agua y aceite, éste se divide en partículas pequeñísimas formando una **emulsión**; pero si se deja esta emulsión en reposo los líquidos se separan y el aceite, menos denso, se va arriba.

### Difusión.

**11. Experimento:** Echemos una disolución de sulfato de cobre en un vaso; coloquemos sobre ella una probeta invertida y llena de agua pura de modo que ambos líquidos queden en contacto. Observemos durante algunos días los líquidos que deben mantenerse en absoluto reposo.

La capa de contacto de ambos líquidos, nítida al principio, se hace difusa y la coloración azul del sulfato de cobre invade poco a poco el agua pura. Este fenómeno se verifica a pesar de la mayor densidad de la disolución del sulfato de cobre y se denomina **difusión**; no se produce por corrientes visibles de los líquidos sino a causa de la atracción molecular, la que produce un movimiento de las moléculas de los puntos de mayor concentración a los de menor concentración y el equilibrio se restablece solamente en el momento en que la totalidad del líquido adquiere igual concentración.

### Osmosis.

**12. Experimento:** Llenemos con una solución concentrada de sulfato de cobre el vaso *A*, cerrado en su parte inferior con papel pergamino o con un trozo de vejiga y provisto arriba de un tubo estrecho en el cual el líquido llega hasta el punto *a*; coloquémoslo dentro de un vaso *B* de modo que la membrana inferior quede en contacto con agua destilada (fig. 11). Observemos lo que sucede después.

La columna líquida avanza en el tubo y comienza a gotear después, lo que nos indica que ha aumentado la cantidad de líquido

encerrado en el vaso A. Al mismo tiempo el agua del vaso B se va coloreando con el sulfato de cobre. Hay pues un doble movimiento líquido: pasa sulfato de cobre del vaso A al B y agua del vaso B al A.

Este fenómeno se denomina **osmosis**. Se llama **endosmosis** a la penetración del agua al vaso A y **exosmosis** a la salida del sulfato de cobre del mismo vaso.

Las membranas que permiten el paso simultáneo de ambos líquidos se llaman **membranas permeables**. Se preparan también membranas o tabiques que permiten solamente el paso de uno de los líquidos y éstas se llaman **semipermeables**.

Pfeffer, profesor de botánica, fué el primero en preparar tales membranas semipermeables, empleando para ello un vaso poroso de arcilla que llenó con una solu-

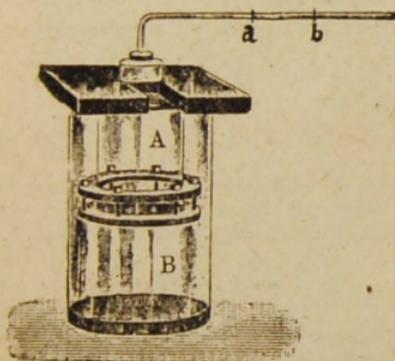


Fig. 11

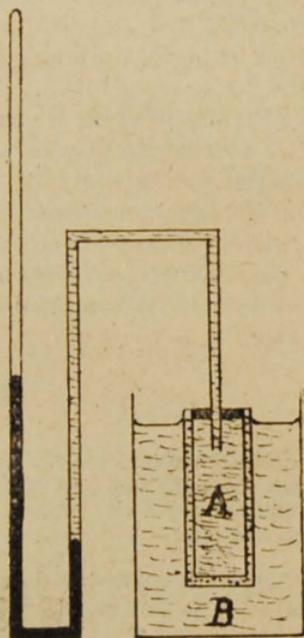


Fig. 12

ción saturada de ferrocianuro de potasio y lo colocó en contacto por el exterior con una solución concentrada de sulfato de cobre; después de algunos minutos se forma dentro de los poros, por contacto de ambos líquidos, una membrana de ferrocianuro de cobre, la que deja pasar únicamente el agua pura.

Para estudiar las leyes de la osmosis, Pfeffer procedió como sigue: llenó el vaso semipermeable A (fig. 12) con una solución de azúcar, lo cerró herméticamente y lo dotó de un manómetro de aire comprimido; lo colocó dentro de un vaso B con agua destilada. Se produce la osmosis, penetra el agua al vaso A y aumenta la presión en éste, la que se observa en el manómetro. Después de cierto tiempo, la presión interior ha llegado a tal valor que impide la penetración de mayor cantidad de agua; entonces la presión permanece constante. En este momento cesa el proceso de la osmosis y la presión constante es la **presión osmótica** característica para la disolu-

ción. La temperatura debe permanecer constante durante la experiencia.

Pfeffer estudió detenidamente las leyes que rigen la osmosis y Van't Hoff evidenció la analogía entre ellas y las análogas que rigen para los gases perfectos.

Las leyes son las siguientes:

1) Para cualquiera disolución, la razón entre la presión osmótica y la densidad de la disolución es constante, entendiéndose por densidad la cantidad de sal disuelta en 1 [cm<sup>3</sup>].

$$(5) \quad \frac{P}{d} = \text{const.}$$

2) La presión osmótica aumenta por cada grado de temperatura en  $\frac{1}{273}$  de la presión que corresponde a 0°. Si esta presión a 0° es  $p_0$ , entonces a 1° es igual a  $p_0 + \frac{1}{273} \cdot p_0$ , a 2° igual a  $p_0 + 2 \cdot \frac{1}{273}$  y a  $t^\circ$  igual a  $p_0 + t \cdot \frac{1}{273} \cdot p_0$ . Designando esta presión por  $p_t$ , resulta:

$$(6) \quad p = p_0 \left( 1 + \frac{1}{273} \cdot t \right).$$

3) Soluciones de diferentes sustancias tienen, a igual temperatura, la misma presión osmótica si contienen en igual volumen de disolvente, el mismo número de moléculas disueltas.

Las soluciones que tienen igual presión osmótica se llaman **disoluciones isotónicas**.

La primera ley equivale a la ley de Mariotte en los gases, la segunda corresponde a la ley de Gay-Lussac y la tercera es análoga a la ley de Avogadro, que dice que volúmenes iguales de gases diferentes a igual temperatura y presión contienen igual número de moléculas.

Van't Hoff expresó las dos primeras leyes en una sola: **la presión osmótica de una disolución es igual a la que ejercería la sustancia disuelta si sus moléculas ocuparan un volumen igual al del disolvente, en forma gaseosa.**

La osmosis es de importancia capital en la alimentación de los seres animales y vegetales, ya que es el proceso que permite la absorción de los alimentos disueltos.

Para los vegetales las sustancias útiles que se encuentran en disolución en la tierra, son absorbidas osmóticamente a través de las paredes de las células de los pelos radicales y siguen hacia el interior de toda la planta por el mismo procedimiento hasta alcanzar los

vasos leñosos que la conducen hasta las hojas. El protoplasma de las células consume para su vida una parte de las sustancias que recibe y se mantiene el desequilibrio osmótico que permite la continuidad de dicho proceso.

Las sustancias del suelo que son insolubles en el agua, no podrían ser absorbidas por las plantas (carbonato y fosfato de calcio) si no fueran transformadas en sustancias solubles por los ácidos que secretan los pelos radicales.

### Dialisis.

Como hay sustancias que obedecen fácilmente a la osmosis (sustancias cristalóideas) y otras que se niegan a ella (coloídeas) Graham aprovechó dicha diferencia para separarlas.

El aparato sencillo que empleó se llama **dialisador** y consiste en un vaso cuyo fondo es una membrana permeable; se introduce la mezcla de sustancias cristalóideas y coloídeas dentro del vaso y éste con su membrana en contacto con el agua de un vaso más ancho; las sustancias cristalóideas atraviesan la membrana, no así las coloídeas. Este proceso de separación se llama **dialisis**.

## Cuerpos gaseosos.

### Oclusión.

**13. Experimento:** Recojamos gas amoníaco en una probeta, sobre mercurio e introduzcamos en seguida un trocito de carbón de madera previamente calcinado, y observemos si varía el nivel del mercurio.

Rápidamente sube el nivel del mercurio, lo que comprueba que el volumen de gas disponible disminuye, absorbido por el carbón; este fenómeno se debe a la gran adhesión entre las moléculas del gas y del carbón, absorción. Este fenómeno va acompañado siempre de un gran desprendimiento de calor que a veces basta para llevar a la incandescencia a cuerpos sólidos.

Esta absorción de gases por cuerpos sólidos se llama **oclusión**.

Un cuerpo muy conocido por su enorme poder adsorbente es la esponja de platino que se utilizó mucho para la fabricación de los encendedores automáticos, en las lámparas de gas.

Como un ejemplo diremos que un volumen de paladio puede absorber hasta 643 veces su volumen de hidrógeno y el carbón de madera 90 volúmenes. Estos valores cambian considerablemente con la temperatura.

## Disolución de gases.

**14. Experimento:** Repitamos el experimento 13, pero en vez de carbón introduzcamos una pequeña cantidad de agua en el tubo.

El volumen de gas disminuye con gran rapidez debido a que, por la gran adhesión entre el líquido y el gas, éste se disuelve.

La cantidad de gas que puede disolverse en cierta cantidad de líquido disminuye rápidamente si se eleva la temperatura y la ebullición repetida puede eliminarlo del todo.

**Henry** comprobó además que un volumen determinado de líquido disuelve siempre el mismo volumen de gas, independiente de la presión y, como la masa de gas de volúmenes iguales es proporcional a la presión, cuanto mayor sea ésta, mayor será la masa de gas disuelta. Esta ley es aproximada, y en ella se basa la preparación de bebidas gaseosas.

El líquido está en contacto con el gas anhídrido carbónico a tres atmósferas de presión y bajo esa presión se embotella. Al destaparla, la presión baja a una atmósfera, el exceso de gas se desprende en forma de burbujas abundantes.

La solubilidad de los gases es diferente; así, por ejemplo, 1 [cm<sup>3</sup>] de agua a 0° y a la presión normal disuelve 0,02 [cm<sup>3</sup>] de nitrógeno, 0,04 de oxígeno, 1,8 de gas anhídrido carbónico, 4 de hidrógeno sulfurado, 80 de anhídrido sulfuroso y 1050 de amoníaco.

A 15° la cantidad disminuye mucho y solamente disuelve igual cantidad de agua, 1 [cm<sup>3</sup>] de anhídrido carbónico, 43,6 de anhídrido sulfuroso y 727 de amoníaco.

Si se trata de una mezcla de gases en contacto con un líquido, cada gas se disuelve independientemente, como si estuviera solo. El aire atmosférico contiene en cada [cm<sup>3</sup>], 0,21 [cm<sup>3</sup>] de oxígeno y 0,79 de nitrógeno; el oxígeno se disuelve en el agua en doble cantidad y por consiguiente el aire disuelto en el agua es más rico en oxígeno que el aire atmosférico.

## Difusión y osmosis.

**15. Experimento:** Llenemos el vaso *A* (fig. 13) con hidrógeno (incoloro) y el *B* con bióxido de nitrógeno (gas de color pardo), cerrada la llave que los separa, cuidando que ambos gases estén a igual presión; abramos la llave intermedia y observemos si los gases se mezclan lentamente o no.

Pronto veremos que el vaso *A* comienza a colorearse de color pardo, lo que nos dice que los gases se mezclan poco a poco, a pesar de que el inferior es más denso. Al fin ambos gases llegarán a mezclarse homogéneamente.

Este fenómeno se llama **difusión**.

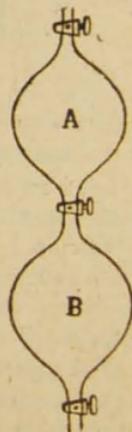


Fig. 13

**16. Experimento:** Coloquemos el vaso poroso permeable *A* (fig. 14) lleno de aire y provisto de un manómetro *B* con agua, dentro de una campana *C* que llenamos con gas de alumbrado; veamos la presión que marque el manómetro.

El nivel del agua baja de *a* y sube de *b*, lo que nos indica aumento de presión dentro del vaso *A*, o sea que ha entrado a él mayor cantidad de gas que la de aire que ha salido de él.

Se ha producido pues, intercambio de gases a través de la membrana; este intercambio a través de una pared permeable se llama **osmosis**.

Si el vaso poroso hubiera contenido aire y la campana gas de anhídrido carbónico habría sucedido lo contrario, es decir, que habría salido del vaso *A* mayor cantidad de aire que la de anhídrido carbónico que hubiera entrado.

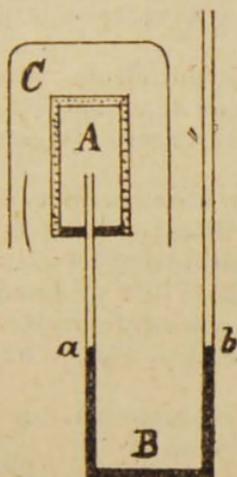


Fig. 14

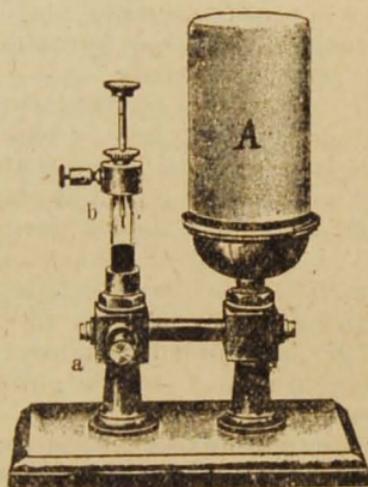


Fig. 15

Las experiencias comprueban además que el gas menos denso pasa en mayor cantidad al través de la membrana permeable.

En ello se basa el **aparato indicador de la presencia de gas grisú**, que se usa en las minas de carbón para prevenir su presencia que es peligrosa.

Consiste en un vaso poroso *A* (fig. 15) que contiene aire y provisto de un manómetro de mercurio con contactos eléctricos en los bornes *a* y *b* que sirven para cerrar un circuito dotado de un timbre. Tal aparato se coloca en los puntos donde puede acumularse el gas grisú. Si éste se acumula en tal punto, por osmosis aumenta la presión en *A* y el mercurio cierra el circuito haciendo funcionar el timbre de alarma.

Todos los fenómenos de osmosis, tanto de líquidos como de gases, ponen de relieve el eterno movimiento molecular.

## Teoría cinética de los gases.

En lo que precede hemos considerado la constitución molecular de los cuerpos y las fuerzas que actúan entre las moléculas. Para la explicación de los fenómenos que produce el calor en ellos hay que suponer que las moléculas están dotadas de movimiento.

La teoría que explica muchos fenómenos a causa de tales movimientos se denomina **teoría cinética de los cuerpos** y ha sido desarrollada por los físicos **Clausius, Maxwell, Boltzmann y Bernoulli**.

Esta teoría supone que los movimientos moleculares dependen del estado de agregación molecular de los cuerpos.

En los cuerpos sólidos las moléculas están muy próximas entre sí y por lo tanto las fuerzas moleculares de las vecinas influyen en tal forma, que solamente pueden tener movimientos oscilatorios y rotatorios en torno de su posición de equilibrio. Las moléculas mantienen su posición relativa con respecto a las que las rodean, formando agrupaciones con ellas.

En los cuerpos líquidos las moléculas pueden oscilar con amplitudes mayores por lo que sus fuerzas moleculares son menores que en los sólidos. Ocurre por esto el caso de que las moléculas pueden independizarse de las fuerzas moleculares de un grupo de moléculas y caer en el radio de acción de otro grupo. Las moléculas no conservan necesariamente su misma posición relativa y se desplazan.

En los cuerpos gaseosos sus moléculas están animadas de un movimiento mucho más vivo. Su distancia es tal que las fuerzas moleculares pueden considerarse nulas y sus movimientos son rectilíneos y uniformes mientras no choquen con otras o con una pared.

A cada choque varía la dirección de la molécula considerada y, como estos choques se repiten continuamente, la molécula seguirá una trayectoria zigzagueante, compuesta de muchos elementos rectilíneos. La velocidad cambia a cada instante pero, como perdura el movimiento, es fácil suponerles una velocidad media constante durante el movimiento.

La teoría cinética de los gases explica muchos de sus fenómenos y leyes.

Desde luego, los gases ejercen siempre presión sobre las paredes del recipiente que los contiene a causa de los repetidos choques de las moléculas sobre ellas; debido a la resistencia de la pared la molécula da un bote con la misma velocidad y en sentido contrario.

**La suma de los choques de las moléculas sobre cada [cm<sup>2</sup>] de la pared constituye la presión.**

Supongamos que el recipiente tenga la forma de un cubo cuya arista es  $a$  (fig. 16); la molécula demorará en llegar de una pared a

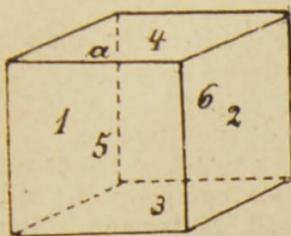


Fig. 16

la opuesta el tiempo  $\frac{a}{v}$  siendo  $v$  la velocidad media de las moléculas y entre dos choques consecutivos contra la misma pared, será  $t = \frac{2a}{v}$ ; el número de choques por segundo será  $n = \frac{1}{t} = \frac{v}{2a}$ . Considerando que a cada choque la velocidad se invierte en sentido, podemos decir que pasa de  $+v$

a  $-v$ ; la ecuación  $F \cdot t = m \cdot v$  que rige para los impulsos nos da para cada molécula y por segundo:

$$F_1 \cdot 1 = n \cdot 2mv$$

$$F_1 \cdot 1 = \frac{v}{2a} \cdot 2mv = \frac{mv^2}{a}$$

Esta fuerza  $F_1$  que actúa contra la pared puede ser considerada constante porque las moléculas están produciendo sus choques sin interrupción a causa de su inmenso número.

Como la presión es la misma sobre todas las paredes, podemos suponer que el conjunto total de las moléculas encerradas, cuyo número designaremos por  $N$ , se divide en tres grupos que producen rebotes el primero sobre el par de caras 1,2; el segundo sobre el par 3,4 y el tercero sobre 5,6. Cada grupo tendrá  $\frac{N}{3}$  moléculas y éstas producirán la fuerza  $F$ :

$$F = \frac{N}{3} \cdot \frac{mv^2}{a}$$

Esta fuerza actúa sobre la cara cuya superficie es  $a^2$  [cm<sup>2</sup>] y la presión que ejerce es  $p = \frac{F}{a^2}$ . Resulta:

$$p = \frac{N}{3} \cdot \frac{mv^2}{a^3}$$

El valor  $a^3$  mide el volumen  $V$  del cubo, y podemos escribir la ecuación anterior en la forma:

$$(7) \quad p = \frac{N}{3} \cdot \frac{mv^2}{V}$$

que es la **ecuación fundamental de la teoría cinética de los gases**.

Todas las propiedades de los gases y sus leyes se explican fácilmente por medio de esta ecuación.

Por ejemplo, si el volumen del gas se reduce a la mitad o a la tercera parte,  $\frac{V}{2}$  o  $\frac{V}{3}$ , el valor de  $p$  se hace doble o triple respectivamente, lo que nos da la ley de Mariotte.

# Teoría de las ondas.

## Movimiento oscilatorio.

**17. Experimento:** A la esfera *A* (fig. 17), sostenida por dos resortes en forma de espiral, apliquémosle un impulso hacia abajo y observemos el movimiento resultante.

La esfera adquiere un movimiento típico de vaivén entre dos posiciones límites *B* y *C*, equidistantes de la posición inicial de equilibrio *A*. Dicho movimiento se denomina **movimiento oscilatorio**.

La distancia *AC* entre la posición inicial y la posición extrema se llama la **amplitud** de la oscilación. El movimiento *ABACA* se denomina una **oscilación completa**.

La **duración de una oscilación completa** o **período** es el tiempo que demora el cuerpo en recorrer la trayectoria anterior.

El número de las oscilaciones que el cuerpo ejecuta en cada segundo de tiempo se denomina la **frecuencia** del movimiento oscilatorio. La frecuencia interesa especialmente cuando su número es grande.

Si el período es *T* y la frecuencia es *n*, es fácil comprobar que el uno es el valor recíproco del otro, es decir

$$\text{que } T = \frac{1}{n} \text{ y } n = \frac{1}{T}.$$

En otro capítulo se estudia este tipo de movimiento con más detención. Aquí lo mencionamos únicamente para la aplicación más cómoda de la materia que sigue. (Véase Mecánica: tomo I).

Supongamos que tenemos una serie de partículas unidas entre sí por elásticos y que a la primera de ellas le comunicamos dicho movimiento, ella tendrá que arrastrar a las demás haciéndolas oscilar unas tras otras y naturalmente mediando un corto retraso entre las llegadas de las partículas a una posición extrema.

Si consideramos en seguida una serie de partículas que forma parte de un cuerpo, y hacemos oscilar una de ellas, sucederá lo mismo que acabamos de decir, ya que sabemos que las moléculas están ligadas por las fuerzas moleculares, la cohesión que les impide alejarse y la expansión que les impide acercarse.

## Ondas transversales.

Consideremos una serie de moléculas de un cuerpo, que se encuentran en equilibrio (fig. 18) y apliquémosle un impulso hacia

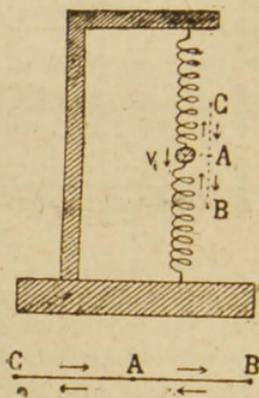


Fig. 17

arriba a la 1, que la haga oscilar entre dos posiciones extremas; si esta oscilación dura un tiempo  $T$ , después de la primera cuarta parte de dicho tiempo,  $\frac{1}{4} T$ , la molécula 1 habrá llegado a su posición extrema superior, ejerciendo una fuerza de tracción sobre todas las moléculas que la siguen, hasta otra molécula que llamaremos 2 y

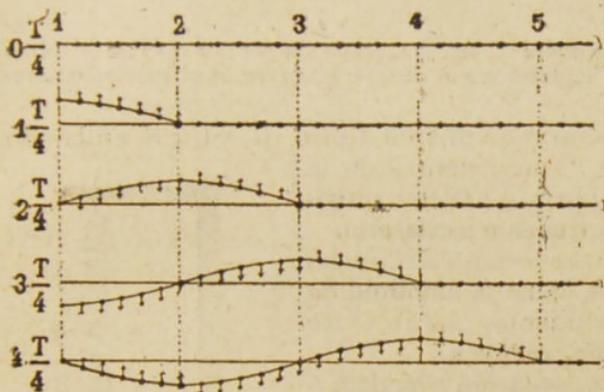


Fig. 18

todas ellas se moverán hacia arriba, unas en pos de otras. Durante el segundo  $\frac{1}{4} T$  la molécula 1 habrá regresado a su posición de equilibrio y las que la siguen hacen un movimiento análogo; la molécula 2 llegará a su posición extrema superior arrastrando consigo a las partículas siguientes, hasta una que designaremos con el número 3; al concluir los  $2 \cdot \frac{1}{4} T$ , todas las partículas entre las 1 y 2 marchan hacia abajo, y las entre 2 y 3 hacia arriba. Transcurrido el tercer  $\frac{1}{4} T$  la partícula 1, debido a la energía que lleva pasa a la posición extrema inferior, mientras que la 2 regresa a su posición de equilibrio y la 3, a causa del impulso recibido, va a la posición extrema superior, ejerciendo tracción sobre las siguientes, hasta la que designamos como partícula 4; todas las partículas comprendidas entre las 1 y 3 van hacia abajo y las entre 3 y 4 hacia arriba. Durante el cuarto  $\frac{1}{4} T$ , la partícula 1 vuelve a su posición de equilibrio, la número 2 llega a la posición extrema inferior, la número 3 a la posición de equilibrio y la número 4 a la posición extrema superior, ejerciendo tracción sobre las que la siguen hasta la número 5; al concluir los  $4 \cdot \frac{1}{4} T$ , todas las partículas entre las 1 y 2 van hacia arriba, entre las 2 y 4 hacia abajo, entre las 4 y 5 hacia arriba.

La primera partícula acaba de hacer una oscilación entera y, a causa de las fuerzas moleculares, se han puesto en movimiento todas las que la siguen hasta la número 5 y todas las partículas que oscilan forman una curva que recibe el nombre de **onda**, cuya longitud es la distancia que media entre las partículas 1 y 5, es decir, la longitud hasta la cual se ha propagado el movimiento molecular, mientras la 1 ha hecho una oscilación entera. Las partículas entre las 1 y 3 forman un valle y las entre las 3 y 5, un monte.

**La longitud de una onda es el espacio que comprende a todas las moléculas a las cuales se ha transmitido el movimiento de la primera, mientras ésta ha hecho una oscilación entera.**

El movimiento de propagación en un cuerpo homogéneo es uniforme y es fácil calcular su velocidad  $v$ ; si  $T$  es la duración de

todas ellas se moverán hacia arriba, unas en pos de otras. Durante el segundo  $\frac{1}{4} T$  la molécula 1 habrá regresado a su posición de equilibrio y las que la siguen hacen un movimiento análogo; la molécula 2 llegará a su posición extrema superior arrastrando consigo a las partículas siguientes,

una oscilación entera, y  $\lambda$  la longitud de una onda, resulta que en 1 segundo el movimiento se propaga hasta la distancia  $\frac{\lambda}{T}$  y este valor es precisamente la velocidad:

$$(8) \quad v = \frac{\lambda}{T}.$$

Si cada partícula hace  $n$  oscilaciones por segundo, como a cada oscilación el movimiento avanza la longitud  $\lambda$ , el movimiento se habrá propagado a la distancia  $n \cdot \lambda$  en 1 segundo y este valor es otra vez la velocidad  $v$ :

$$(9) \quad v = n \cdot \lambda.$$

En estas ondas que acabamos de estudiar, las partículas oscilan en sentido perpendicular con respecto al de la propagación del movimiento oscilatorio y se llama **ondas transversales**.

### Ondas longitudinales.

¿Qué sucederá si a la partícula 1 le damos un impulso hacia la derecha, es decir, en el mismo sentido en que se propaga el movimiento?

La partícula 1 se mueve hacia la derecha hasta cierta posición límite (fig. 18); se acerca a las partículas vecinas que a su vez se presionan unas a otras; debido a las fuerzas moleculares, dicha partícula 1 vuelve hacia la izquierda y debido a su velocidad se pasa de la posición de equilibrio y se aleja hacia la izquierda hasta una distancia igual a la que recorrió hacia la derecha; aquí también las fuerzas moleculares la hacen regresar hacia la derecha. La partícula 1 hace, pues, oscilaciones de izquierda a derecha y viceversa.

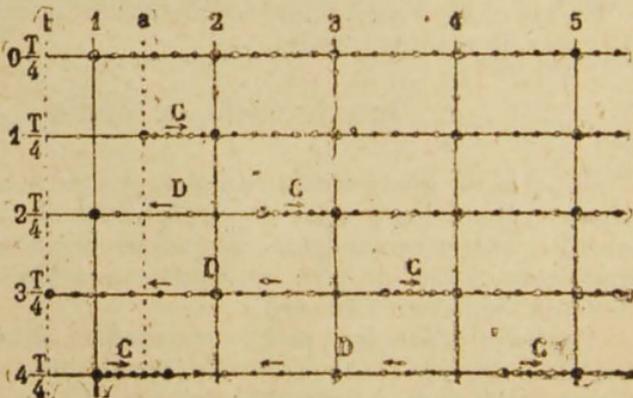


Fig. 19

Designemos la duración de una oscilación entera por  $T$  y veamos lo que sucede a cada cuarta parte de  $T$ .

Después de  $\frac{1}{4} T$  la partícula 1 ha llegado a su posición límite derecha (fig. 19) y ha presionado a las partículas que siguen hasta la 2, produciéndose una compresión entre 1 y 2: En el  $2.^\circ \frac{1}{4} T$ , la partícula 1 ha vuelto a la posición inicial (de equilibrio); la 2, de-

bido a la presión que recibió, se ha movido hacia la derecha, presionando las partículas siguientes hasta la 3; ahora hay compresión entre las partículas 2 y 3 y depresión entre las 1 y 2. En el 3.<sup>er</sup>  $\frac{1}{4} T$  la partícula 1 ha pasado a la izquierda a su posición extrema; la número 2 ha vuelto a su posición de equilibrio; la 3, debido a la compresión que ha sufrido, ha llegado a su posición extrema derecha, presionando las partículas que siguen hasta la 4; ahora se ha producido compresión entre 3 y 4 y depresión entre 1 y 3. Durante el 4.<sup>o</sup>  $\frac{1}{4} T$ , la partícula 1 ha vuelto a su posición inicial, la 2 a su posición extrema izquierda, la 3 a su posición de equilibrio, la 4 a su posición extrema derecha, presionando las partículas siguientes hasta la 5, ahora hay compresiones entre las partículas 1 y 2 y también entre las 4 y 5, y hay depresión entre las 2 y 4. La primera partícula ha efectuado una oscilación entera y el movimiento molecular se ha propagado hasta la número 5. La distancia que media entre las moléculas 1 y 5 que mide la longitud a la cual se ha propagado el movimiento se llama **longitud de la onda**.

Estas ondas en las cuales las partículas oscilan en dirección a la propagación se llama **ondas longitudinales**.

Designando como antes la longitud de las ondas por  $\lambda$ , su duración por  $T$ , la velocidad de la propagación del movimiento por  $v$  y el número de oscilaciones por segundo de cada molécula por  $n$ , rigen las mismas relaciones que hemos conocido bajo los números (7) y (8):

$$v = \frac{\lambda}{T}, \quad v = n\lambda.$$

En las ondas longitudinales tenemos compresiones y depresiones en vez de montes y valles.

### Interferencia de ondas.

Se habla de **interferencia de ondas** cuando sobre un mismo medio se propagan dos grupos de ondas, de modo que uno y otro se alcanzan y entremezclan como cuando se dejan caer dos piedras a cierta distancia una de otra, en agua tranquila; ambas producen ondas que luego se confunden.

Algunas moléculas serán accionadas simultáneamente por ambas ondas en un mismo sentido, por lo que se alejarán más de sus posiciones de equilibrio, aumentando la amplitud de sus oscilaciones; otras estarán accionadas en sentidos contrarios por las dos ondas y la amplitud de sus oscilaciones disminuirá y podrá llegar a anularse.

Pueden presentarse muchos casos diferentes de los cuales estudiaremos cinco.

1) **Composición de dos ondas, I y II, de igual longitud y amplitud, que tienen sus orígenes en dos puntos cuya distancia es exactamente igual a la longitud de onda, y que se mueven en el mismo sentido.**

Una partícula *a* (fig. 20) estará impelida por ambas ondas que quieren llevarla hacia arriba hasta *o*, y como ambas fuerzas se suman, duplicarán la amplitud de su oscilación llevándola hasta *c*. Todas las demás partículas estarán en idénticas condiciones.

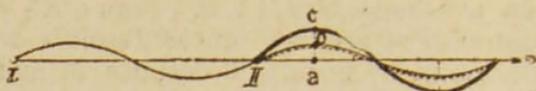


Fig. 20

Si los orígenes estuvieran a la distancia  $2\lambda$ ,  $3\lambda$ , . . . o a cualquier múltiplo de  $\lambda$  resultará lo mismo.

Dos ondas de igual amplitud y longitud cuyos orígenes estén a una distancia igual a la longitud de una onda o de un múltiplo de ella, producen una onda resultante de doble amplitud.

2) Composición de dos ondas, I y II, de igual amplitud y longitud, que tienen sus orígenes a la distancia  $\frac{1}{2}\lambda$ , mitad de la longitud de las ondas, y que se mueven en el mismo sentido.

En este caso, todas las partículas resultan sometidas a dos fuerzas iguales y contrarias que se anulan y todas quedan en absoluto reposo (fig. 21). Lo mismo sucede si los orígenes distan cualquier múltiplo

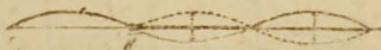


Fig. 21

impar de  $\frac{\lambda}{2}$ .

Dos ondas de igual amplitud y longitud cuyos orígenes están a una distancia igual a la mitad de la longitud de una onda o a un múltiplo impar de ella, se anulan.

3) Composición de dos ondas cualesquiera, que se mueven en el mismo sentido.

Basta formar para cada partícula (fig. 22) la suma o resta de las amplitudes de ambas ondas componentes, según que actúen las dos hacia un mismo lado o en sentidos contrarios. Por ejemplo, para el punto *a*, una de las ondas quiere llevarlo a la posición *c* y la otra a la posición *b*; la partícula irá hacia la posición *e*, siendo  $ae = ab - ac$ .



Fig. 22

La onda resultante tendrá distinta amplitud y longitud que las ondas componentes si éstas difieren en amplitud y longitud.

4) Composición de dos ondas de igual amplitud y longitud que se mueven en sentido contrario.

En la 1.ª línea de la fig. 23 se representa el momento preciso en que ambas ondas, I y II, se encuentran en el punto *A*. En la 2.ª línea, la situación después de  $\frac{1}{4}T$  la primera llega a *A*<sub>1</sub> (ha recorrido  $\frac{1}{4}\lambda$ ), la segunda llega a *A*<sub>2</sub> (también ha recorrido la longitud  $\frac{1}{4}\lambda$ , aunque en sentido contrario); las ondas se superponen entre *A*<sub>1</sub> y *A*<sub>2</sub>

y resulta media onda de doble amplitud. En la 3.<sup>a</sup> línea las ondas han avanzado otro  $\frac{1}{4}\lambda$ , la I llega a  $A'_1$  y la II a  $A'_2$ ; siendo ambas contrarias se produce reposo absoluto de las moléculas entre  $A'_1$  y  $A'_2$ . En la 4.<sup>a</sup> línea,  $\frac{1}{4}T$  después, la onda I llega  $A''_1$  y la II a  $A''_2$ ; ambas actúan sobre las moléculas con fuerzas iguales y producen

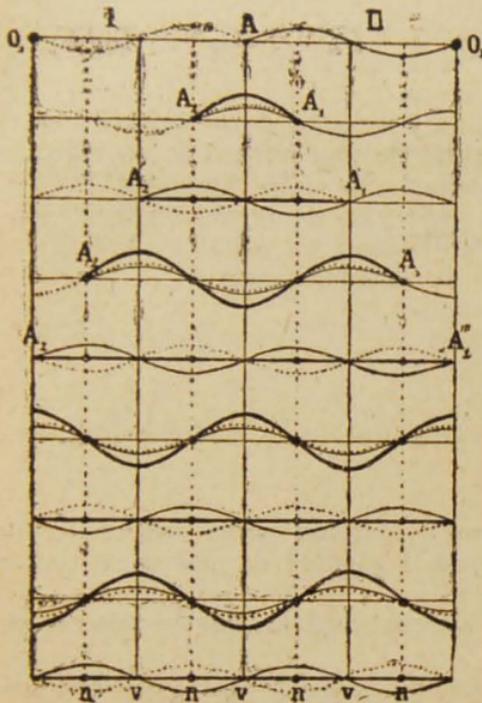


Fig. 23

entre  $A''_1$  y  $A''_2$  ondas de doble amplitud. En la 5.<sup>a</sup> línea las ondas llegan a  $A'''_1$  y a  $A'''_2$ , respectivamente, actúan sobre las moléculas con fuerzas iguales y contrarias, produciendo absoluto reposo. En las líneas 6.<sup>a</sup> y 7.<sup>a</sup>, 8.<sup>a</sup> y 9.<sup>a</sup> se representan las situaciones que siguen en cuarto de  $T$ , alternando las ondas de doble amplitud con los reposos absolutos de las moléculas a causa de la interferencia de las ondas I y II.

Esta onda resultante se llama **onda estacionaria**.

Observando atentamente la fig. 23 se ve que hay puntos  $n$  cuyas moléculas permanecen inmóviles todo el tiempo, son los **nodos**, y, entre ellos, puntos que pasan alternativamente del reposo al movimiento, son los **vientres**.

Podemos caracterizar la onda estacionaria, diciendo que es una onda en que algunas partículas cuya distancia es  $\frac{1}{2}\lambda$  permanecen siempre en reposo y cuyas partículas intermedias oscilan pasando en un mismo instante por la posición de equilibrio y aumentando sus amplitudes a medida que se alejan de ellas para alcanzar la amplitud máxima, la que se encuentra al medio.

### 5) Composición de ondas directas y reflejadas sobre sí mismas.

Si una onda encuentra un obstáculo durante su marcha y retrocede reflejada, se produce también el estado estacionario, porque ambas, la directa y la reflejada, interfieren.

Una onda puede reflejarse al chocar contra un medio más denso que aquel en que se propaga y también con uno menos denso.

a) Reflexión de una onda sobre un medio más denso.

En las consideraciones anteriores hemos visto que cada partícula arrastra consigo a las siguientes y que todas ejecutan el mismo movimiento, porque reciben el mismo impulso y tienen la misma masa; pero estas condiciones cambian para la última partícula del primer medio que recibe el mismo impulso y tiene que arrastrar una partícula más pesada, la primera del segundo medio, de modo que sufre una retardación mayor, por lo que su amplitud es menor. La causa de una retardación tenemos que buscarla en una fuerza que obra en sentido contrario al movimiento; el efecto del medio más denso es el mismo que resultaría si la última partícula del primer medio hubiera sufrido un impulso contrario al que recibe de la partícula anterior. Este impulso se transmite a las partículas hacia atrás, de modo que la onda reflejada interfiere con la directa, y como el impulso tiende a mover la partícula en sentido contrario al que le daría la partícula anterior, hay entre la onda directa y la reflejada una diferencia de fase igual a  $\frac{1}{2} \lambda$ , designando por fase el estado de oscilación de la partícula.

Si suponemos que el segundo medio es mucho más denso que el primero, la retardación será tan grande que la última partícula del primer medio no saldrá de la posición de equilibrio, o sea que el contraimpulso es tal que destruye el efecto del impulso que proviene de la partícula anterior y por este motivo la última partícula queda en reposo. Representamos por la fig. 24, línea 1, el momento en que la onda llega a la última partícula 5 y tiende a moverla hacia arriba. A causa del impulso que recibe de la partícula anterior se encontraría después de  $\frac{1}{4} T$  en la posición extrema superior y la onda tendría la posición de la línea 2; pero la partícula 5 recibe del segundo medio un impulso en sentido contrario y suponiéndolo igual al que recibe de la partícula anterior, la partícula se encontraría después del tiempo  $\frac{1}{4} T$  en la posición extrema inferior y la onda reflejada se habría propagado hacia atrás hasta la partícula 4; estas dos ondas interfieren y las partículas entre 4 y 5 quedan en reposo; después de  $\frac{2}{4} T$  la onda direc-

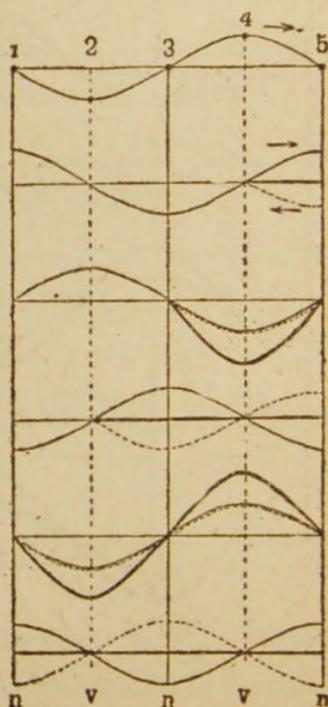


Fig. 24

ta tiene la posición de la línea 3, y la reflejada ha llegado hasta 3, de modo que los efectos de las ondas se suman; después de  $\frac{3}{4} T$  las ondas tienen la posición de la línea 4 y se anulan; después de  $\frac{1}{4} T$  las ondas tienen la posición de la línea 5 y sus efectos se suman; después de otro  $\frac{1}{4} T$  las ondas tienen la posición de la línea 6 y se anulan; continuando así la composición de las ondas directa y reflejada, veremos que siempre hay reposo en los puntos, 5, 3, 1 que son por este motivo, los nodos, mientras que las partículas entre ellos oscilan entre dos posiciones extremas pasando al mismo instante por la posición de equilibrio; se forma un estado estacionario y en el límite se encuentra un nodo.

### b) Reflexión de una onda sobre un medio menos denso.

En este caso, la última partícula del primer medio tiene que arrastrar consigo una masa menor que las anteriores y por este motivo su retardación será menor o, lo que es lo mismo, su aceleración será mayor. A cada aumento corresponde una fuerza mayor; por este motivo podemos identificar el efecto del segundo medio sobre la última partícula con el de un impulso que actúa en el mismo sentido que el que recibió de la partícula anterior.

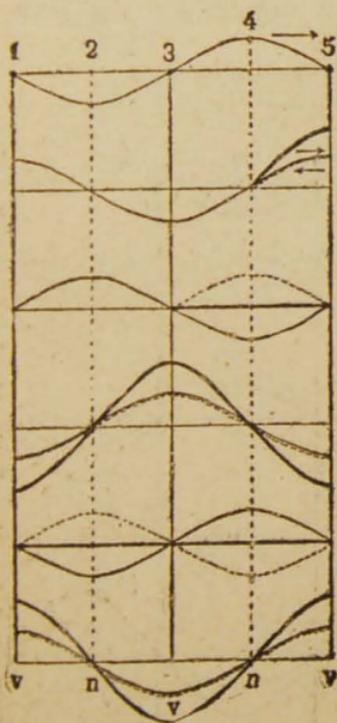


Fig. 25

Este impulso se propaga también hacia atrás causando la formación de una onda reflejada y como los dos impulsos actúan en el mismo sentido, no hay diferencia de fase.

La fig. 25, línea 1 representa el momento en que la onda se ha propagado hasta la última partícula del primer medio. Después de  $\frac{1}{4} T$  tendría la posición de la línea 2. Suponiendo que el impulso proveniente del segundo medio sea igual al impulso dado a la partícula 5 por la partícula anterior, la onda reflejada habría llegado a la partícula 4 y coincidiría con la onda directa, de modo que las dos se suman.

Las líneas 3 a 6 indican la posición de las partículas después de  $\frac{2}{4} T$ ,  $\frac{3}{4} T$ , etc. Vemos que en el límite se forma un vientre y el primer nodo en 4 a una distancia del límite igual a  $\frac{1}{4} \lambda$  y el otro en 2 a una distancia igual a  $\frac{1}{2} \lambda$  del primer nodo.

Las mismas consideraciones rigen para las ondas longitudinales, sólo que hay que reemplazar el movimiento de las partículas perpendicular a la dirección de la propagación por un movimiento que coincide con ella.

Para el caso en que el segundo medio sea más denso, resulta un estado estacionario que en la fig. 26 está representado en sus distintos momentos  $0, \frac{1}{4} T, \frac{2}{4} T$ , etc. Las partículas 1, 3, 5, los nodos, quedan siempre en reposo, mientras que todas las partículas entre 1 y 3 se mueven al mismo tiempo hacia la derecha y las entre 3 y 5 hacia la izquierda, produciendo en 1 y 5 depresiones y en 3 una compresión; después de otro  $\frac{1}{4} T$  todas las partículas han vuelto a su posición inicial y tienen igual distancia, pero a causa de la velocidad que poseen siguen su movimiento y las partículas entre 1 y 3 se mueven ahora hacia la izquierda y las entre 3 y 5 hacia la derecha, produciendo en 1 y 5 compresiones y en 3 una depresión. Vemos que en los nodos se producen alternativamente depresiones y compresiones, mientras que en los vientres 2 y 4 hay movimiento muy vivo de las partículas y no cambios de densidad. Para el caso en que la reflexión tiene lugar sobre un medio menos denso, el límite coincide con un vientre y el primer nodo está en 4 a una distancia igual a  $\frac{1}{2} \lambda$  del límite.

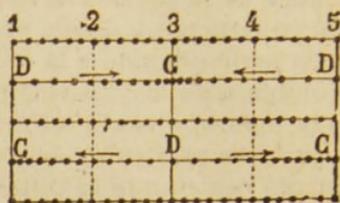


Fig. 26

### Medios en que pueden propagarse las ondas.

Conociendo las dos clases de ondas, longitudinales y transversales, podemos preguntarnos todavía si pueden propagarse en cualquier medio. Para contestar a esta pregunta tenemos que ver de qué manera se forman. Para que puedan formarse ondas transversales, tienen que actuar entre las moléculas fuerzas de cohesión que se opongan a la separación y como esta fuerza es insignificante en los líquidos y gases no pueden propagarse ondas transversales en tales medios.

**Las ondas transversales sólo pueden propagarse en los cuerpos sólidos.**

Las ondas longitudinales pueden formarse en todos los medios cuyas moléculas se oponen a un acercamiento con una fuerza de expansión bastante grande y como éstas existen en todos los cuerpos, **las ondas longitudinales pueden propagarse en cualquier medio.**

Sin embargo, si cae una piedra al agua, del punto de penetración salen ondas que pueden considerarse como ondas transversales, lo que parece estar en contradicción con las consideraciones anteriores. Pero un estudio detallado nos hace ver que estas ondas

no tienen nada que ver con las fuerzas moleculares, sino que la causa de ellas es la gravedad. La piedra baja una cantidad de agua que a causa de la presión del agua vecina tiene que subir; pero llegada a la superficie no queda en reposo, sino que sigue su movimiento hacia arriba debido a la velocidad que tiene, hasta que la gravedad la obliga a bajar. La partícula del agua, por el impulso que recibió de la piedra, ejecuta un movimiento oscilatorio. Cuando se levanta la primera partícula, las partículas vecinas bajan formando alrededor del centro una cavidad circular y cuando este líquido sube, baja la capa vecina, de modo que después de cierto tiempo podemos distinguir una serie de montes y valles que rodean el centro en forma de anillos concéntricos.

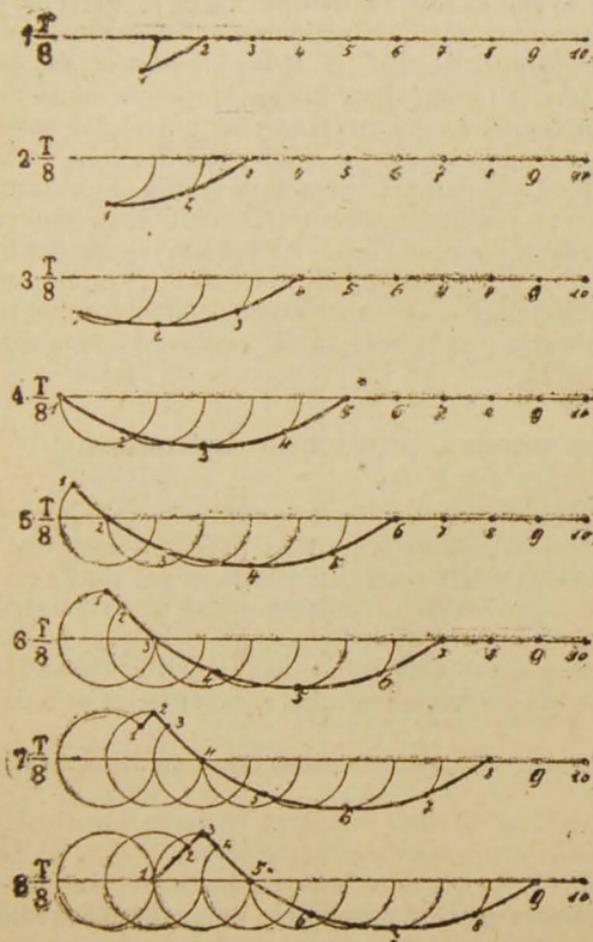


Fig. 27

Los hermanos Weber estudiaron el movimiento de las partículas que forman parte de tales ondas, y lo hicieron visible dejando suspenso en el agua polvo de ámbar que posee igual densidad. Resultó que las partículas de agua describen curvas en el plano vertical, puesto por la dirección de la propagación; cerca de la superficie son círculos que se deforman en elipses, cuyo eje vertical disminuye a medida que aumenta la distancia a la superficie.

La fig. 27 indica cómo se forman tales ondas por el movimiento circular; en la construcción se supone que cada partícula siguiente empieza su movimiento  $\frac{1}{8} T$  des-

pués que la anterior, y cuando la primera ha recorrido la circunferencia se ha formado una onda entera cuya forma no es **sinoidal**, sino que el monte y el valle son muy distintos.

# Acústica.

La acústica comprende el estudio de los fenómenos que se perciben por el oído.

## Producción de ruidos y sonidos.

**18. Experimento:** Golpeemos la mesa con una regla, demos un martillazo a un trozo de metal, vaciemos una caja de clavos. ¿Qué percibimos?

Oímos **ruidos** de corta duración.

**19. Experimento:** Démosle un golpe a una cuerda bien tendida o a una varilla sostenida firmemente por uno de los extremos. ¿Qué oímos ahora?

Ahora no oímos un ruido sino un **sonido**, agradable al oído, de mayor duración y regularidad.

¿Cuál es la causa de los sonidos y de los ruidos?

**20. Experimento:** Repitamos el experimento 19, observando atentamente la cuerda o la varilla.

Vemos que la cuerda y la varilla oscilan rápida y regularmente y que, tan luego como cesa su oscilación, desaparece el sonido.

Los sonidos son producidos por movimientos oscilatorios continuos y regulares que forman en el aire alternativamente compresiones y depresiones (fig. 28), que se propagan en forma de ondas longitudinales, que en estos casos se llaman **ondas sonoras**, y que al llegar al oído producen la sensación del sonido.



Fig. 28

Los ruidos son también producidos por vibraciones, pero irregulares y violentas, de modo que al llegar por medio del aire al oído producen sensaciones desagradables.

**21. Experimento:** Fijemos una varilla de acero de 40 cm de largo por uno de sus extremos, hagámosla oscilar acortando poco a poco su longitud libre y observemos el sonido que produce.

Al principio oscila lentamente y pueden contarse sus oscilaciones por segundo, sin que oigamos un sonido. A medida que se acorta la varilla aumenta la rapidez de las oscilaciones y comienza a oírse un sonido muy bajo que se hace después más agudo.

No basta, pues, que el cuerpo vibre para que haya sonido, sino que su número debe pasar de cierto límite.

## Propagación del sonido.

Acabamos de ver que un sonido se forma por las vibraciones de un cuerpo, que dan origen a ondas longitudinales que se transmiten por medio del aire al oído. ¿Con qué velocidad se propagan estas ondas en la atmósfera?

Esta velocidad se determinó en los alrededores de París. Se colocaron cañones de artillería en dos colinas visibles la una desde la otra y se dispararon alternativamente, midiéndose con cronómetros de precisión cada vez el tiempo que transcurrió desde el instante en que se veía el fogonazo hasta aquel en que llegaba el ruido al oído del observador. Los disparos alternativos obedecían a la necesidad de eliminar la influencia del viento. Conocida previamente la distancia exacta de los dos puestos de observación, se dividió dicha distancia por el tiempo medio y resultó la velocidad de  $340 \left[ \frac{\text{m}}{\text{seg}} \right]$  a la temperatura de  $15^\circ$ . A  $0^\circ$  la velocidad se produjo a  $333 \left[ \frac{\text{m}}{\text{seg}} \right]$ ; la temperatura influye bastante, como se ve. La velocidad a cualquiera temperatura  $t$  puede determinarse por la fórmula  $v = 332,4 \sqrt{1 + 0,00357 t}$ .

¿Hay otros medios que permitan la propagación de las ondas sonoras?

**22. Experimento:** Toquemos una campanilla sumergida en agua. ¿Se oye su sonido?

Se lo oye claramente, lo que nos dice que las vibraciones de la campanilla se transmiten como ondas sonoras al agua y de ésta al aire.

**Colladon y Sturm** determinaron en el lago Ginebra la velocidad con que se propaga el sonido en el agua. Se instalaron en dos botes a distancia medida y en uno de ellos colocaron una campana sumergida en las aguas del lago; para hacerla sonar colocaron un martillo sostenido, bajo gran tensión, por una cuerda impregnada de una substancia inflamable, que al quemarse con una llamarada daba aviso al otro bote del instante preciso en que sonaba la campana; en el otro bote se había colocado una bocina con su parte ancha sumergida en las aguas y la angosta pegada al oído del observador que oía así la llegada del sonido a través del agua. La velocidad de propagación del sonido en el agua a  $8^\circ$  fué de  $1\,435 \left[ \frac{\text{m}}{\text{seg}} \right]$ .

**23. Experimento:** Pongamos un reloj de bolsillo sobre una tabla larga y oprimamos el oído al otro extremo de ella.

Oímos claramente el tic-tac del reloj y dejamos de oírlo si separamos el oído de la tabla. No cabe duda que el sonido se propaga en este caso a través del cuerpo sólido.

Biot aprovechó las cañerías del agua potable de París para determinar la velocidad con que se propaga el sonido en el hierro, golpeándolas con un martillo; le resultó una velocidad 15 veces mayor que la del aire.

Por otros experimentos se ha encontrado la velocidad de propagación del sonido en la madera de pino 18 veces mayor y en el cobre 12 veces mayor que en el aire.

¿Se propaga también el sonido en el vacío?

**24. Experimento:** Coloquemos sobre la platina de una máquina neumática una campana con un timbre adentro y mientras toca extraigamos el aire. Dejemos entrar después el aire. ¿Se oye el sonido en todo momento?

El sonido que al principio es fuerte se apaga poco a poco y reaparece aumentando su intensidad cuando entra aire a la campana.

El sonido no se propaga en el vacío.

En resumen, el **sonido no se propaga en el vacío porque requiere un medio ponderable y la velocidad de su propagación es máxima en los cuerpos sólidos, menor en los líquidos y mínima en los gases.**

### Intensidad del sonido; su disminución a la distancia.

**25. Experimento:** Hagamos sonar una cuerda alejándola primero muy poco y después mucho de su posición de equilibrio. Compárense en ambos casos los sonidos que produce.

En el primer caso apenas se oye el sonido que produce; en el segundo se oye perfectamente. Ha cambiado la intensidad del sonido juntamente con la amplitud de las oscilaciones.

**La intensidad de un sonido aumenta o disminuye según que aumente o disminuya la amplitud de las oscilaciones que lo producen.**

La mayor amplitud de las oscilaciones de la cuerda produce vibraciones más violentas del aire y mayores choques de éste con la membrana del tímpano de nuestro oído. La intensidad del sonido está ligada a la energía cinética del aire que vibra junto al tímpano y esta energía varía con la distancia a que se encuentra el cuerpo sonoro.

Supongamos que en un punto  $A$  (fig. 29) suena una campanilla; su masa oscila con cierta rapidez y posee una energía cinética bien determinada. El movimiento se transmite a la capa de aire que la rodea y se propaga en forma de capas esféricas concéntricas que son cada vez

mayores. Después de un momento, la energía cinética se ha transmitido a la capa  $A_1$  de radio  $r_1$ , más tarde a la capa  $A_2$  de radio  $r_2$ ; si designamos sus masas respectivas por  $m_1$  y  $m_2$  (siendo sus espe-

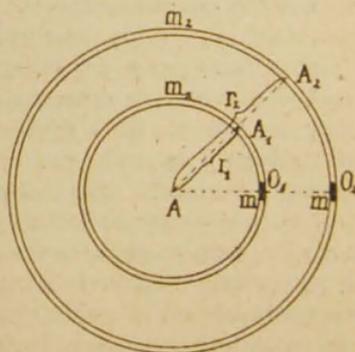


FIG. 29

sores iguales y muy pequeños) dichas masas son proporcionales a los cuadrados de sus distancias al origen  $A$ :

$$m_1 : m_2 = r_1^2 : r_2^2$$

Las energías cinéticas de ambas masas son iguales entre sí:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

$$m_1 : m_2 = v_2^2 : v_1^2$$

Comparemos con la proporción anterior y obtenemos:

$$v_1^2 : v_2^2 = r_2^2 : r_1^2.$$

Los valores  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades de las partículas vibrantes del aire.

Si suponemos ahora que la masa del aire en contacto con el tímpano es  $m$ , las intensidades  $I_1$  e  $I_2$  del sonido en los puntos  $C_1$  y  $C_2$  serán proporcionales a las energías cinéticas de dicha masa de aire en uno y otro caso:

$$I_1 : I_2 = \frac{1}{2} m v_1^2 : \frac{1}{2} m v_2^2 = v_1^2 : v_2^2$$

Pero

$$v_1^2 : v_2^2 = r_2^2 : r_1^2$$

(10)

$$I_1 : I_2 = r_2^2 : r_1^2.$$

**Las intensidades de un sonido varían en razón inversa a los cuadrados de su distancia al origen.**

Un cañonazo oído a 10 cuadras de distancia tiene la centésima parte de la intensidad con que se oye a 1 cuadra. El sonido se apaga rápidamente si aumenta la distancia del punto en que se produce y ello se debe a que sus ondas se propagan en todos sentidos; si se limita la propagación del sonido a una dirección más o menos fija, esta disminución de intensidad puede evitarse en buena parte.

A ello están destinados los **tubos de conversación** que se usan en las fábricas, en los edificios con varios pisos comunicados, en los automóviles cerrados, etc. Constan de un simple tubo destinado a transmitir las ondas sonoras que se concentran en la **embocadura** de forma cóncava y penetran al tubo para salir con casi toda su intensidad por el otro extremo. Para la llamada se les coloca generalmente un pito en cada extremo; si se quiere hablar se saca el de la embocadura y se sopla por ella, lo que hace sonar el otro; se acerca la persona llamada, quita el pito y pone el oído en su lugar.

Las personas tardas de oído usan la **trompetilla acústica** para oír mejor; es una especie de embudo que termina en un tubo de goma que puede adaptarse cómodamente a la entrada del oído; si una persona habla en la parte ancha, las ondas chocan con las paredes de la trompeta, se concentran y llegan al tímpano con mucha intensidad.

El **estetoscopio** que usan los médicos para auscultar a los enfermos, se asemeja a la trompetilla acústica; es un tubo cónico cuya parte ancha se aplica al organismo y la estrecha al oído. Los ruidos interiores del cuerpo (producidos por el corazón, por los pulmo-

nes, etc.), producen ondas sonoras que se concentran y aumentan de intensidad, lo que los hace muy claros al oído.

## Reflexión del sonido. Eco.

**26. Experimento:** Coloquemos un reloj de bolsillo sobre un pedazo de fieltro y hagámosle un tubo de igual substancia a su alrededor; pongamos frente a su salida un espejo (placa de metal o vidrio)  $EE_1$  (fig. 30) inclinado a  $45^\circ$  sobre la horizontal y busquemos la colocación  $O$  del oído que permite oír claramente el tic-tac; busquemos la relación entre los ángulos formados por las ondas sonoras directas y reflejada con la perpendicular  $MN$  al espejo llamada la **normal**; variemos la inclinación del espejo y repitamos las observaciones anteriores.

El tic-tac del reloj se oye claramente cuando el oído está primero en  $O$ ; el  $\sphericalangle RMN$  que forma la onda sonora  $RM$  con la normal  $MN$  y llamado **ángulo de incidencia**, es igual, al  $\sphericalangle NMO$  que forma la onda reflejada  $MO$  con la normal  $MN$  y que se denomina **ángulo de reflexión**.

Si giramos el espejo a la posición  $E'E_1$ , la normal será  $MN'$ ; el oído habrá que colocarlo en  $O'$  y el nuevo ángulo de incidencia,  $RMN'$  será igual al nuevo ángulo de reflexión  $N'MO'$ .

Resulta así una ley muy sencilla: **el ángulo de incidencia de una onda sonora es igual al ángulo de reflexión de la misma.**

Si el sonido se produce sobre la normal misma, el ángulo de incidencia es nulo y lo es igualmente el de reflexión; el sonido en este caso se refleja sobre el plano y vuelve sobre sí mismo pasando nuevamente por el punto donde se originó. Si la distancia es corta, el sonido reflejado se mezcla con el incidente, pero si es suficientemente grande, se le oye distintamente y es lo que se llama **eco**.

Si se trata de una palabra hablada y no de un grito, puede el eco repetir la última o las dos o tres últimas sílabas de la palabra. Se ha calculado que una persona que habla normalmente pronuncia 5 sílabas por segundo, de modo que entre sílaba y sílaba transcurre  $\frac{1}{5}$  [seg]; si el eco repite a continuación de la palabra hablada la última sílaba (**eco monosilábico**), ésta debe llegar al oído  $\frac{1}{5}$  de seg después de terminada la palabra, de modo que debe emplear  $\frac{1}{10}$  seg en llegar al obstáculo y otro  $\frac{1}{10}$  en volver al oído; el obstáculo debe estar situado a  $\frac{1}{10}$  de 340 [m] de distancia, a 34 [m]. Si el obstáculo estuviera situado a doble distancia, a 68 [m], el eco repetirá las últimas 2 sílabas, el **eco sería bisilábico**. Si se repiten muchas sílabas, el eco es **polisilábico**.

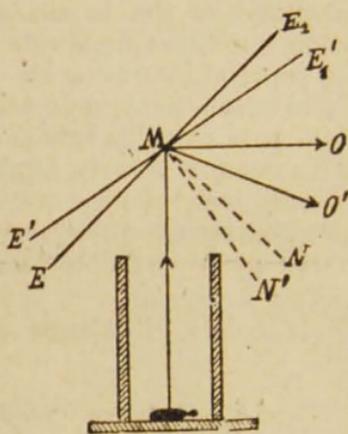


Fig. 30

Si se grita dentro de una quebrada cuyas dos paredes son más o menos paralelas, se puede oír el eco muchas veces, porque el sonido se refleja de pared a pared y se habla entonces de un **eco múltiple**; este eco debería repetirse infinitas veces, pero su intensidad se apaga poco a poco, de acuerdo con la fórmula (10).

Si la distancia del obstáculo es menor que 34 [m] puede el eco llegar a confundirse con cada sílaba y reforzar la voz y se dice que la sala tiene **buena acústica**; o llega al auditorio el eco de una sílaba mezclándose con la sílaba directa siguiente y perturba la clara audición y se dice que la sala tiene **mala acústica**; estos fenómenos tienen especial interés en los teatros, iglesias, salas de conferencias, etc., y si la sala tiene mala acústica, conviene cubrir las paredes con cortinas para evitar la reflexión de las ondas.

También se observa fácilmente que dentro de una sala se oyen los sonidos más intensos que al aire libre, porque en el primer caso la onda reflejada contribuye a aumentar la intensidad de los sonidos, mientras que al aire libre sólo se reciben las ondas directas.

## Altura de los sonidos.

### Sirena de Savart.

**27. Experimento:** Hagamos sonar con igual intensidad distintas notas en un piano o en un violín. ¿En que se distinguen?

Unos sonidos son más agudos, otros más bajos; se dice que su **altura** es distinta.

¿De qué depende la altura de un sonido?

Emplearemos para ello la **sirena de Savart** que consta de un conjunto de 4 ruedas dentadas colocadas sobre un mismo eje, pero que tienen dientes de distinto tamaño, de tal modo que su número es de 40, 50, 60 y 80 dientes, respectivamente. Si se la hace girar por medio de una máquina centrífuga y se toca su borde con un pedazo de cartulina (una tarjeta de visita por ejemplo) adquirirá éste una vibración rápida debido a los choques de los dientes y sus vibraciones se transmiten al aire produciendo un sonido.

**28. Experimento:** Demos una marcha uniforme a la sirena de Savart y toquemos sucesivamente sus cuatro ruedas dentadas con una cartulina y fijémosnos en las alturas de los sonidos que produce.

Si pasamos la cartulina de la rueda de 40 a la de 50, 60 y 80 dientes, observaremos que la altura de los sonidos se hace mayor al pasar de una a la otra.

**La altura de un sonido es tanto mayor cuanto mayor sea su número de oscilaciones por segundo.**

Si la sirena de que hablamos tuviera un mecanismo **cuenta-vueltas** podríamos emplearla para medir el número de oscilaciones por segundo de un sonido cualquiera, de una cuerda por ejemplo; bastaría variar su velocidad de rotación hasta que produjera un so-

nido de igual altura y contar el número de vueltas por seg y multiplicarlo por el número de dientes de la rueda empleada para tener el número de oscilaciones de tal sonido. Si en ese momento la rueda diera 10 vueltas por seg y sus dientes fueran 40, se producirían  $10 \cdot 40 = 400$  oscilaciones por segundo.

Existe una sirena distinta de la anterior que cumple con todos esos requisitos.

### La sirena de Cagniard de La Tour. (no).

Su parte inferior es una cámara de aire provista de un tubo cónico (fig. 31) que puede ajustarse perfectamente a uno de los orificios de una mesa-fuelle que le proporciona el aire necesario. La tapa de la caja es circular y tiene 4 series de agujeros equidistantes inclinados hacia un mismo lado y que forman circunferencias concéntricas. Estas series tienen 8, 10, 12 y 16 agujeros, respectivamente. Sobre este disco y a muy corta distancia de él se encuentra otro disco rotatorio de igual tamaño, con igual número de agujeros distribuidos de idéntica manera, pero inclinados en sentido contrario a los anteriores (fig. 31). Si se hace entrar aire a la cámara de la sirena, tiene que salir por los agujeros de la tapa, de la serie que esté abierta, este aire choca con las paredes inclinadas de los agujeros correspondientes del disco móvil y le dan un impulso que lo hace girar; como estos choques se producen cada vez que los agujeros estén frente a frente y sobre cada uno de ellos simultáneamente, el disco móvil adquiere un movimiento rotatorio cuya velocidad aumenta rápidamente. En el momento que los agujeros de una serie coinciden, vamos a suponer que la de 16, se produce una salida de aire por todos ellos, resultando una compresión de la atmósfera sobre el disco;

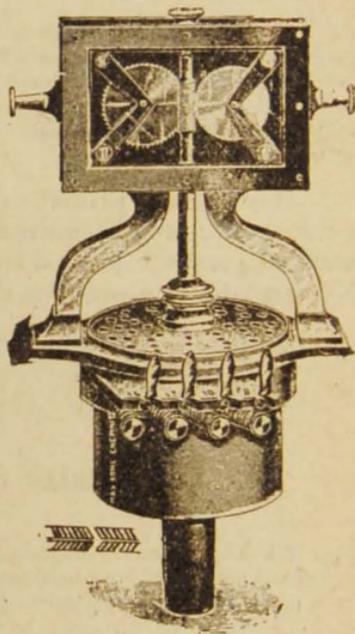


Fig. 31

se tapan todos simultáneamente y se forma una depresión de dicho aire; vuelven a coincidir y se produce otra compresión; después se tapan, nueva depresión; como la rotación del disco es muy rápida, las compresiones y las depresiones se suceden rápidamente y se produce un sonido (basta que el número de oscilaciones sea mayor que 16). Si el disco móvil da una vuelta por seg, se producirán 16 oscilaciones por seg, si da  $n$  vueltas, se producirán  $16 n$  oscilaciones.

Para contar el número de vueltas, el eje del disco móvil se alarga hacia arriba y está provisto de un tornillo sin fin que conecta con una rueda dentada, cuyos 100 dientes engranan perfectamente con el hilo del tornillo, de modo que la rotación del eje se transmite a la rueda y éste da una vuelta si el disco da 100 vueltas; el eje de la rueda sale al exterior de la tapa y tiene un puntero cuyo extremo recorre un limbo dividido en 100 partes. La rueda tiene un tope cuyo extremo va a tocar los dientes de otra rueda, de modo que a cada vuelta de la primera mueve a la segunda en un diente. Un resorte le impide volver atrás. También está provista de un puntero que recorre un 2° limbo del que cada división corresponde al avance de la rueda en 1 diente y a 100 vueltas del disco.

Un mecanismo especial permite establecer o suspender el contacto entre el tornillo sin fin y la primera rueda, haciéndola funcionar o no.

Con esta sirena es fácil determinar el número real de oscilaciones de un sonido, producido por una cuerda, por ejemplo.

**29. Experimento:** Suspendamos el contacto entre el tornillo sin fin y la rueda dentada y anotemos los números que indican los punteros, hagamos funcionar la sirena hasta que produzca un sonido igual al que produce la cuerda que suena y pongamos en contacto la rueda con el tornillo durante 10 [seg] cortándolo otra vez. Anotemos el nuevo número que marcan los punteros y calculemos el número de oscilaciones por segundo.

Restamos el primer número que marcaron los punteros del segundo, esta resta la multiplicamos por el número de agujeros de la serie empleada y el total lo dividimos por el número de segundos. El resultado es el número de oscilaciones del sonido.

**Ejemplo:** Serie empleada de 16 agujeros, número de los punteros 2100 y 54, números finales 2300 y 17, tiempo 10 [seg]:  $2317 - 2154 = 163$  vueltas del disco;  $163 \cdot 16 = 2608$  oscilaciones en 10 [seg];  $2608 : 10 = 260,8$  oscilaciones por seg.

## Las escalas musicales. Los intervalos.

**30. Experimento:** Hagamos funcionar la sirena de Cagniard de La Tour a velocidad constante, produzcamos el sonido de la serie de 8 agujeros, después el de 16 y finalmente los dos juntos. ¿Qué impresión producen?

Los sonidos juntos se confunden a tal punto que nos parece oír uno solo, nos produce una sensación muy agradable y se dice que hay **consonancia** entre ambos.

La música estudia estas combinaciones de sonidos.

El primero de los dos sonidos es la **tónica**, el otro, que tiene doble número de oscilaciones que el anterior, es la **octava** del primero. Los números de vibraciones entre la octava y el sonido fundamental se caracterizan por la razón  $\frac{2}{1}$  que se denomina su **intervalo**.

**31. Experimento:** Repitamos el experimento 30 una vez para las series de 8 y 10 agujeros y después para las de 8 y 12 agujeros.

En ambos casos la sensación es agradable, de modo que también hay consonancias. Ambas están caracterizadas por las razones o intervalos  $\frac{10}{8} = \frac{5}{4}$  y  $\frac{18}{8} = \frac{9}{4}$ , que reciben respectivamente los nombres de **la tercera** y **la quinta**.

Haciendo sonar conjuntamente otros pares de sonidos, se encontrarán algunos agradables, **consonantes**, y otros desagradables, **disonantes**; determinando sus intervalos, se llega como resultado a la regla formulada por **Pythagoras: una consonancia es tanto más perfecta cuanto más sencilla es la razón entre los números de vibraciones de los sonidos que la componen**.

Se pueden formar infinitos intervalos, pero en música solamente se emplean algunos de ellos; los de la siguiente serie tienen los nombres que se indican en la 2.<sup>a</sup> línea y los sonidos que les corresponden van en la 3.<sup>a</sup> línea:

$\frac{1}{1}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{2}{1}$
unísono,	segunda,	tercera,	cuarta,	quinta,	sexta,	séptima	octava
<i>Do</i>	<i>Re</i>	<i>Mi</i>	<i>Fa</i>	<i>Sol</i>	<i>La</i>	<i>Si</i>	<i>Do<sub>1</sub></i>

El conjunto de los sonidos correspondientes a estos 8 intervalos constituye la **escala diatónica mayor**.

Que el intervalo de *Fa* es  $\frac{4}{3}$ , quiere decir que el número de vibraciones de la nota *Fa* es al número de vibraciones de la nota *Do* como 4:3.

En lo que precede nos hemos preocupado de una sola octava; en la música se usan, por lo general, 8 octavas y sus notas se distinguen por medio de índices, por ejemplo: *Do<sub>-2</sub>*, *Do<sub>-1</sub>*, *Do<sub>1</sub>*, *Do<sub>2</sub>*, *Do<sub>3</sub>*, *Do<sub>4</sub>*, *Do<sub>5</sub>*, *Do<sub>6</sub>*, *Do<sub>7</sub>*.

### Nota normal y números absolutos de oscilaciones de los sonidos.

Conociendo los intervalos de los sonidos que se usan en la música y el número de oscilaciones de uno solo de ellos, es fácil calcular los que les corresponden a los demás. El Congreso Internacional de Músicos de Viena (1885) eligió como **nota normal el *La<sub>3</sub>* que hace 435 oscilaciones por seg** y para conservarla se construyó un diapasón normal.

Partiendo del valor de *La<sub>3</sub>* puede determinarse el número de oscilaciones de la nota *Do<sub>3</sub>* de la escala diatónica mayor por la proporción: *La<sub>3</sub> : Do<sub>3</sub> = 5 : 3*

$$Do_3 = \frac{3 \cdot 435}{5} = 261 \text{ oscil. por seg.}$$

*Do<sub>2</sub>* hace la mitad de dicho número: *Do<sub>2</sub> = 130,5 osc.*

Análogamente: *Do<sub>1</sub> = 65,25*, *Do<sub>-1</sub> = 32,625*, *Do<sub>-2</sub> = 16,3125 osc.*

Para las octavas agudas: *Do<sub>4</sub> = 522*, *Do<sub>5</sub> = 1044*, *Do<sub>6</sub> = 2088*, *Do<sub>7</sub> = 4176* oscilaciones.

Las demás notas se calculan por sus intervalos dentro de la escala. Por ejemplo  $Fa_2$ :

$$Fa_2: Do_2 = 4 : 3 ; Fa_2 = \frac{4 \cdot 130,5}{3} = 174 \text{ osc.}$$

La nota  $Do_{-2}$  se produce por medio de un tubo sonoro y la  $Do_7$  por el flautín. La voz humana varía entre límites más reducidos.  $Do_1$  como nota extrema inferior para los bajos y  $Do_3$ , la nota más alta de las sopranos.

## Los límites de los sonidos perceptibles.

El límite inferior de los sonidos perceptibles coincide con la nota inferior musical  $Do_{-2}$ , no así el límite superior que es mucho más alto que el musical.

**32. Experimento:** Golpeemos con un martillito las varillas de acero cuyas notas son  $Do_7$ ,  $Do_8$ ,  $Do_9$ ,  $Do_{10}$  y  $Do_{11}$  y veamos si las percibimos.

Las varillas de  $Do_7$ ,  $Do_8$ ,  $Do_9$  y  $Do_{10}$  nos hacen percibir sonidos pero no la de  $Do_{11}$ .

Como a  $Do_{10}$  le corresponden 33 408 oscilaciones, se ve que nuestro oído percibe sonidos aún con más de 33 000 oscilaciones por segundo.

**Appun** construyó una serie muy grande de diapasones que producían las notas agudas de octava en octava, y haciéndolos sonar sucesivamente comprobó que el oído cesaba de percibir sonidos cuando el diapason producía cerca de 40 000 oscilaciones por segundo.

## Longitud de onda de los sonidos en el aire.

Conocidos los números absolutos de las oscilaciones de las diferentes notas, puede calcularse fácilmente la longitud de onda que le corresponde a cada uno de ellos en el aire.

Partimos de la fórmula (9)  $v = \lambda n$  que nos da  $\lambda = \frac{v}{n}$ . Si hacemos el cálculo para el aire a la temperatura de  $15^\circ$ , es  $v = 340 \left[ \frac{\text{m}}{\text{seg}} \right]$ . Para la nota  $La_3$  resulta:

$$\lambda_{La_3} = \frac{34000}{435} = 78,2 \text{ [cm].}$$

Si el sonido es más bajo resulta una longitud mayor y si es más agudo su onda es más corta. El oído percibe sonidos cuya longitud de onda varía entre 2 125 [cm] y 1 [cm].

### Preguntas.

- 1) Para que se nos oiga bien ¿por qué tenemos que hablar en voz más alta al aire libre que dentro de una sala?
- 2) Biot ha comprobado que puede conversarse a 1 000 [m] de distancia, hablando en voz baja, por dentro de una cañería. ¿Cómo se explica esto?
- 3) ¿Se propagan con igual velocidad los sonidos bajos que los agudos? Si así no fuera ¿cómo oíríamos las piezas ejecutadas por las orquestas o bandas?
- 4) Si observamos a un trabajador que golpea con un martillo a la distancia ¿oímos el golpe al mismo tiempo que lo vemos?
- 5) ¿Cómo se explica la formación del trueno y su larga duración?
- 6) ¿De qué modo podemos aprovechar la velocidad de propagación del sonido en la atmósfera para determinar la distancia a la cual se ha producido un rayo?
- 7) ¿Cómo se explica el ruido producido por una huasca?
- 8) ¿Cómo se explica el ruido que producen algunos insectos?
- 9) ¿Cómo se explica el sonido del teléfono si pasa por él una corriente alterna?
- 10) Si una columna de soldados que ocupa un trecho de 1 000 [m] hace una descarga cerrada ¿durante cuántos seg. oye el ruido directo una persona situada en un extremo?
- 11) ¿Por qué se oye débilmente el disparo de un fusil a gran altura?
- 12) ¿Con qué hay que forrar interiormente el cuarto del teléfono para que no se oiga al exterior lo que se habla?
- 13) ¿Cuáles son los intervalos más consonantes y cuáles los más disonantes de una escala diatónica mayor?

### Problemas.

- 1) Una sirena funciona con una serie de 12 agujeros <sup>de 2 cm</sup> ¿cuántas vueltas por segundo debe dar el disco para que toque la nota  $La_3$ ?
- 2) Si la sirena emplea la serie de 10 agujeros y da 2 400 vueltas por minuto ¿cuántas oscilaciones hará una cuerda que da la misma nota?
- 3) Calcular los intervalos y buscar las notas de la escala diatónica mayor que comienza con  $Mi$  como nota fundamental (escala de  $Mi$  mayor).
- 4) Calcular el número de oscilaciones de las notas  $Re_1$ ,  $Mi_2$ ,  $Fa_4$  y  $Si_{-1}$ .
- 5) Entre el instante en que cae el rayo y el en que comienza el trueno transcurren 20 [seg] ¿a qué distancia se produjo el rayo?

### Ejercicios prácticos.

Determinar las notas de varios instrumentos por medio de la sirena.

## Los instrumentos musicales.

Si examinamos los instrumentos que forman parte de las orquestas podemos clasificarlos en tres grupos: instrumentos de cuerdas, de varillas y placas, y de viento.

¡Nómbrense algunos instrumentos pertenecientes a cada grupo!

## Los instrumentos de cuerdas.

Para que una cuerda pueda vibrar es indispensable que esté sometida a cierta tensión debido a una fuerza exterior para que tenga así la elasticidad necesaria.

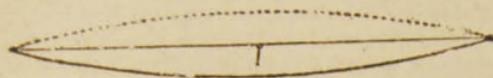


Fig. 32

Si la cuerda está sostenida únicamente en sus extremos, vibra con toda su longitud como lo muestra la fig. 32 dándonos su sonido fundamental que es al mismo tiempo el sonido más bajo que ella puede producir.

Para estudiar los factores que influyen en la altura del sonido que produce una cuerda se emplea el **sonómetro** (fig. 33) que con-

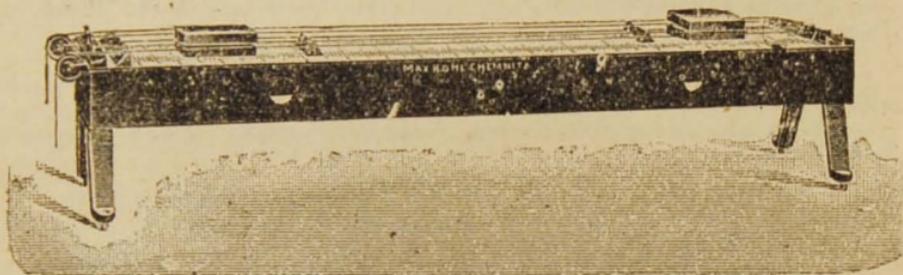


Fig. 33

siste en una caja sonora sobre la cual pueden colocarse varias cuerdas en distintas condiciones.

**33. Experimento:** Afinemos la cuerda que estudiamos con una nota *Do* de un piano o de un pianito de juguete (1) y acortémosla sucesivamente hasta los  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{2}{3}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{2}{5}$ ,  $\frac{3}{5}$ ,  $\frac{4}{5}$  y  $\frac{1}{2}$  de su longitud e identifiquemos los sonidos que produce con otras notas del pianito.

Las notas que resultan son *Re*, *Mi*, *Fa*, *Sol*, *La*, *Si*, *Do*.

Los números de vibraciones de *Re* y *Do* son entre sí como 9 : 8 y los largos de las cuerdas como 8 : 9; si designamos sus números de oscilaciones por  $n_{Do}$  y  $n_{Re}$  y los largos de las cuerdas que los producen por  $l_{Do}$  y  $l_{Re}$ , resulta que

$$n_{Re} : n_{Do} = 9 : 8 \quad \text{y} \quad l_{Do} : l_{Re} = 9 : 8$$

$$n_{Re} : n_{Do} = l_{Do} : l_{Re}$$

Igual resultado se obtiene para las demás notas y podemos decir que **los números de oscilaciones que hacen las cuerdas son**

(1) Conviene comparar la altura de los sonidos de la cuerda con las notas de un buen pianito de juguete, porque los alumnos no estarán capacitados para apreciar los intervalos por el oído solo, y difícilmente se tendrá a disposición un piano u otro instrumento de notas fijas.

**inversamente proporcionales a sus longitudes** (siendo iguales sus demás condiciones).

$$(11) \quad n_2 : n_1 = l_1 : l_2.$$

**34. Experimento:** Coloquemos en el sonómetro dos cuerdas de igual longitud y de la misma naturaleza, que pasan ambas por poleas y sostienen cada una un peso de 5 kg, pero la segunda de doble diámetro que la primera; hagámoslas sonar y determinemos su intervalo.

La segunda cuerda produce un sonido que es la octava inferior del de la primera.

**Los números de oscilaciones de dos cuerdas son inversamente proporcionales a sus diámetros** (siendo iguales sus demás condiciones).

$$(12) \quad n_2 : n_1 = d_1 : d_2.$$

**35. Experimento:** Coloquemos una cuerda que pasa por una polea en el sonómetro y hagámosla sonar colgando en su extremo libre, sucesivamente, pesas de 1, 4 y 9 kg. Determinemos los intervalos sucesivos de los sonidos que produce.

La segunda nota es la octava aguda de la primera y la tercera, la quinta de la segunda. El primer intervalo es  $\frac{2}{1}$  y el segundo  $\frac{3}{2}$  y, como las tensiones de las cuerdas son entre sí como  $\frac{1}{1}$  y  $\frac{9}{4}$ , nos resulta que

$$\frac{2}{1} = \frac{\sqrt{4}}{\sqrt{1}} \quad \text{y} \quad \frac{3}{2} = \frac{\sqrt{9}}{\sqrt{4}}.$$

**Los números de oscilaciones de dos cuerdas son proporcionales a las raíces cuadradas de sus tensiones** (siendo iguales sus demás condiciones).

$$(13) \quad n_2 : n_1 = \sqrt{p_2} : \sqrt{p_1}.$$

**36. Experimento:** Coloquemos en el sonómetro dos cuerdas de igual longitud y diámetro bajo la misma tensión, pero siendo distintas sus densidades (por ej. de aluminio 2,6 y de plata 10,5), hagámoslas sonar y determinemos su intervalo.

La cuerda de aluminio da un sonido que es la octava aguda del de la otra, es decir, que hace doble número de oscilaciones y, como la densidad de la plata es más o menos 4 veces mayor que la del aluminio, podemos escribir que  $\frac{2}{1} = \frac{\sqrt{4}}{\sqrt{1}}$ .

**Los números de oscilaciones de dos cuerdas son inversamente proporcionales a las raíces cuadradas de sus densidades** (siendo iguales sus demás condiciones).

$$(14) \quad n_2 : n_1 = \sqrt{\lambda_1} : \sqrt{\lambda_2}.$$

De los experimentos 33 a 36 se deduce que el sonido que produce una cuerda depende de su longitud, de su diámetro, de su tensión y de su densidad. ¿De qué modo oscila una cuerda si se fija uno de sus puntos?

Si tocamos suavemente una cuerda por su punto medio, oscila de tal modo que se forma un vientre al medio y un nodo en cada

uno de sus extremos (fig. 32) dando así la nota más baja posible, su **sonido fundamental**; su longitud corresponde a media onda.

**37. Experimento:** Pongamos un puente que haga contacto en el punto medio de una cuerda cuyo sonido es *Do*<sub>2</sub>, coloquemos jinetes de papel sobre una mitad a pequeñas distancias unos de otros; hagamos vibrar la otra mitad por medio de un arco de violín y observemos los jinetes y la nota resultante.

Todos los jinetes caen de la cuerda, lo que nos indica que, al hacer vibrar una mitad de ella, vibra también la otra mitad. Se forma un estado estacionario con tres nodos (uno en cada extremo y otro al medio) y dos vientres entre ellos; la longitud de la cuerda corresponde ahora a una onda. Una mitad oscila siempre en sentido opuesto a la otra (fig. 34, 1).

(¿Qué nota da la cuerda?).

**38. Experimento:** Repitamos el experimento anterior poniendo el puente de modo que separe  $\frac{1}{3}$  de la longitud de la cuerda y los jinetes sobre la parte mayor de ella.

Saltan todos los jinetes a excepción de aquel que se encuentra exactamente al punto medio de la parte mayor, punto que es un nodo puesto que no se mueve. Se forma, pues, un estado estacionario con 4 nodos y 3 vientres (fig. 34, 2).

(¿Qué nota resulta en este caso?).

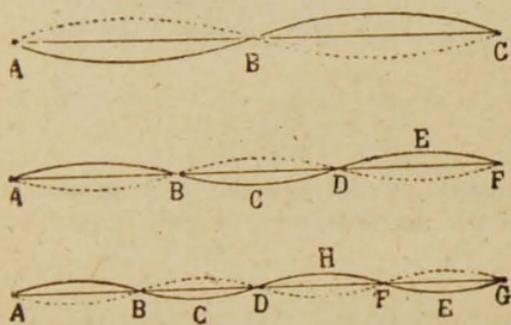


Fig. 34

**39. Experimento:** Repitamos el experimento 37, colocando el puente de modo que separe  $\frac{1}{4}$  de la longitud de la cuerda y los jinetes estén en la parte mayor.

Caen todos los jinetes a excepción de los que dividen la cuerda en cuartas partes. Se forma nuevamente un estado estacionario, esta vez con 5 nodos y 4 vientres (fig. 34, 3).

(¿Qué nota resulta esta vez?).

Puede hacerse lo mismo con otras subdivisiones.

¿Qué razón hay entre los números de oscilaciones de estos sonidos que resultan por subdivisión de la cuerda y el de su sonido fundamental?

Siendo las longitudes de la cuerda vibrante entre sí como  $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{4}$ , los números de oscilaciones son como  $1 : 2 : 3 : 4$ , es decir, que son proporcionales a los números enteros. Estos sonidos toman el nombre de **sonidos armónicos** y tienen gran importancia, porque, al vibrar una cuerda y sin necesidad de que exista un puente cualquiera, se produce de por sí su subdivisión en mayor o menor grado, de modo que el sonido fundamental va siempre acompañado de un grupo de sonidos armónicos; más tarde veremos que tales sonidos armónicos son los que producen el **tímbre** del sonido

y que es la característica que distingue notas exactamente iguales, producidas por instrumentos diversos o por la voz humana.



Fig. 35

A causa de estas subdivisiones, la cuerda al vibrar no puede conservar la forma simple que se indica en la fig. 32, sino otra más complicada y para dar una idea de ello, la fig. 35 fija un momento del caso de ir el sonido fundamental acompañado del primer sonido armónico solamente.

### Las varillas.

Las varillas se distinguen de las cuerdas en que tienen elasticidad propia suficiente para oscilar y no necesitan de una fuerza exterior que se las dé.

Pueden fijárselas por un extremo (fig. 36) o dejarlas descansar sobre dos puntos situados a una distancia que equivalga a  $\frac{1}{5}$  de su largo total (fig. 37).

**40. Experimento:** Sobre un trozo de madera fijemos cuatro varillas por uno de sus extremos, siendo sus longitudes entre sí como  $1 : \sqrt{\frac{4}{5}} : \sqrt{\frac{9}{5}} : \sqrt{\frac{16}{5}}$ , hagámoslas oscilar con un arco de violín, frotándola arriba, y fijémosnos en los intervalos de los sonidos que producen.

La segunda, tercera y cuarta varillas producen sonidos que son la tercera, la quinta y la octava, respectivamente, del de la primera, o sean los intervalos  $\frac{5}{4}$ ,  $\frac{3}{2}$  y  $\frac{2}{1}$ ; a la vari-

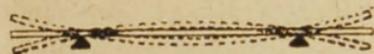


Fig. 37



Fig. 36

lla cuyo largo es  $\sqrt{\frac{4}{5}}$  del largo total le corresponde el intervalo  $\frac{5}{4}$ , de modo que **los números de vibraciones de dos varillas son inversamente proporcionales a los cuadrados de sus longitudes.**

$$(15) \quad n_2 : n_1 = l_1^2 : l_2^2$$

**41. Experimento:** Coloquemos varillas o planchitas de metal, cuyas longitudes guardan entre sí las mismas proporciones de las del experimento anterior, sobre soportes como lo indica la fig. 37, golpeémoslas y fijémosnos en los intervalos de sus sonidos.

Resultan los mismos del experimento anterior, de modo que rige la misma ley, no importando para los intervalos la forma en que estén sujetas las varillas; sin embargo, las notas fundamentales en ambos casos son distintas.

**42. Experimento:** Repitamos el experimento anterior con las planchitas de igual largo y cuyos gruesos sean entre sí como  $1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8} : \frac{9}{4}$ .

Las planchitas dan la escala diatónica mayor, comenzando con el sonido de la más delgada, y como sus intervalos son respectivamente  $\frac{9}{8}$ ,  $\frac{5}{4}$ ,  $\frac{4}{3}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{3}$ ,  $\frac{15}{8}$  y  $\frac{9}{4}$ , podemos afirmar que **los números**

de vibraciones de las varillas son proporcionales a sus gruesos, bajo igualdad de sus demás condiciones:

$$(16) \quad n_2 : n_1 = d_2 : d_1$$

Estas relaciones de la longitud y grueso de las varillas con la nota que dan se aprovecha en algunos instrumentos; en el **pianito** se usan planchitas de acero de igual grueso y de distinta longitud, perfectamente calculadas para producir los intervalos que se desean, en el xilófono se aprovechan varillas de madera de igual longitud y distinto grueso que se golpean por medio de martillitos; las varillas se sostienen sobre dos sostenes de paja.

Las varillas producen sus sonidos más bajos cuando oscilan en la forma indicada en las figuras 36 y 37. En el primer caso el extremo inferior es un nodo y el superior un vientre, de tal modo que la longitud total  $l$  de la varilla equivale a la cuarta parte de una onda:  $l = \frac{1}{4} \lambda_1$  y le corresponden  $n_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4l}$  oscilaciones por seg.

**43. Experimento:** Frotamos las mismas varillas del experimento 40 en puntos que estén a distancias equivalentes a  $\frac{1}{4}$  de sus longitudes desde sus extremos fijos; comparemos sus sonidos con los que dieron antes.

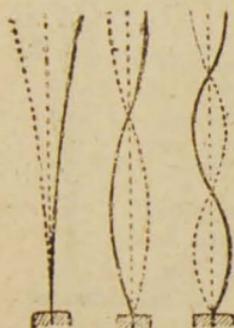


Fig. 38

Ahora dan sonidos más agudos a los cuales les corresponden ondas más cortas; las varillas suenan únicamente si en ellas se producen estados estacionarios y como en el primer tercio debe formarse un vientre, la varilla tiene que subdividirse como lo indica la fig. 38, 2; en este caso es  $l = \frac{3}{4} \lambda_2$  y  $\lambda_2 = \frac{4}{3} l$ , de modo que  $n_2 = \frac{v}{\lambda_2} = 3 \cdot \frac{v}{4l} = 3 n_1$ . Algunas veces resulta un sonido más agudo aún si se frota la

varilla a  $\frac{1}{5}$  de su longitud, a partir de su punto fijo; la subdivisión es entonces la indicada en la fig. 38, 3, siendo

$$l = \frac{5}{4} \lambda_3; \lambda_3 = \frac{4l}{5} \text{ y } n_3 = \frac{v}{\lambda_3} = 5 \cdot \frac{v}{4l} = 5 n_1; \text{ etc.}$$

Se producen los sonidos armónicos que corresponden a la serie de los números impares.

Estos sonidos acompañan siempre en mayor o menor proporción al sonido fundamental y son la causa especial del timbre de la varilla.



Fig. 39

### El diapasón.

Si una varilla se va encorvando poco a poco, sus nodos se acercarán hasta muy pequeña distancia y el instrumento así construido se llama **diapasón** (fig. 39). La ventaja que presentan los diapasones es que muy

difícilmente se subdividen sus varillas al vibrar y, no produciéndose sonidos armónicos, dan un sonido muy puro.

**44. Experimento:** Demos un golpe a una de las dos ramas de un diapasón y observemos cómo vibran.

Las dos ramas se mueven simultáneamente hacia adentro y hacia afuera y estas oscilaciones traen como consecuencia una segunda oscilación del pie en su sentido longitudinal (fig. 39).

Los diapasones, a causa de la pureza de sus sonidos, se usan mucho para producir notas bien determinadas; de este modo se conserva la nota  $La_3$  (la nota normal) anotándose en el diapasón el número de oscilaciones, 435, y la temperatura a la cual ha sido afinado.

### Placas y campanas.

**45. Experimento:** Coloquemos dos placas de igual naturaleza, largo y grueso, pero de distinto ancho, sostenidas por barras paralelas de madera que pasen a  $\frac{1}{2}$  de longitud de sus bordes, hagámoslas vibrar y comparemos sus sonidos.

Las dos láminas dan sonidos iguales; el ancho de las placas no influye en el número de sus oscilaciones; rigen las mismas leyes que en las vibraciones de las varillas.

El caso más sencillo es que la placa vibre como la varilla indicada en la fig. 37, sólo que no habrá puntos nodales sino **líneas nodales**, paralelas a las aristas de sus extremos, a  $\frac{1}{2}$  de la longitud de la placa.

**Chladni** ideó espolvorear arena fina sobre la placa puesta horizontalmente para que, al hacerla vibrar, la arena salte en los vientres y se acumule en las líneas nodales haciéndolas visibles.

**46. Experimento:** Fijemos una placa por su centro valiéndonos de una prensa especial, echémosle arena bien repartida, hagámosla vibrar con un arco de violín en  $b$ , tocándola con un dedo en el punto  $a$  (fig. 40); veamos las líneas nodales.

La placa al vibrar se subdivide simétricamente y las líneas nodales dependen de los puntos  $a$ , que se inmovilizan y que sirven siempre de origen a una línea nodal.

El sonido más bajo de la placa, el fundamental, corresponde a la fig. 40,1 y las 40,2 y 40,3 a sonidos más agudos.

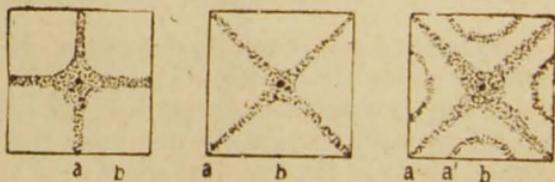


Fig. 40

**47. Experimento:** Fijemos por el centro una placa circular, cubrámosla de arena y hagámosla vibrar.

Sus líneas nodales son diámetros cuyo número varía con los puntos del margen que inmovilizemos. Al sonido más bajo le corresponden dos diámetros perpendiculares que dividen el disco en cuatro sectores que alternadamente oscilan en sentidos contrarios. Si fijamos en su borde dos puntos a una distancia que equivalga a  $\frac{1}{6}$  o  $\frac{1}{8}$  de su circunferencia, se forman 3 ó 4 líneas nodales que forman diámetros que dividen al disco en 6 y 8 sectores iguales.

Si se deforma un disco de manera conveniente formaremos con él una **campana**.

**48. Experimento:** Fijemos una campana de vidrio invertida, por su perilla, echémosle agua hasta los  $\frac{2}{3}$  de su profundidad y frotemos su borde con un arco de violín. Observemos el agua.

El agua vibra y salta en 4 puntos, extremos de 2 diámetros perpendiculares; son los vientres; entre ellos están dos líneas nodales que son diámetros perpendiculares (fig. 41).



Fig. 41

Si esto sucede, la campana produce su sonido más bajo. De igual modo que los discos pueden obtenerse 3 y 4 diámetros nodales; las partes entre dichas líneas oscilan alternándose hacia adentro y afuera.

Las campanas dan sonidos tanto más agudos cuanto menor sea su superficie y mayor su grueso.

**49. Experimento:** Fijemos verticalmente una varilla de latón de 1 [m] de largo que sostiene en su extremo superior un disco sobre el cual espolvoreamos arena; frotemos longitudinalmente la parte inferior de la varilla con un paño con pez de Castilla y veamos las líneas nodales del disco.

Las líneas nodales son circunferencias concéntricas; la parte central vibra y también los otros anillos concéntricos.

Estas subdivisiones se producen también cuando vibran las **membranas** tensas del tambor y del bombo. La altura de los sonidos que producen se varía cambiándoles la tensión.

## Los tubos sonoros.

Los tubos sonoros son de dos clases: de **boca** y de **lengüeta**. Los primeros pueden ser cerrados o abiertos.

Las partes esenciales de un tubo de boca son el pie *A* (fig. 42) que sirve para colocarlo sobre una mesa-fuelle, la cámara de aire *B*, la boca *C* limitada por sus dos labios *l* y *l'* y el tubo *D* que contiene la columna vibrante de aire. El aire que lanza el fuelle por el pie *A* se comprime en la cámara *B* y sale bajo gran presión por la boca formando una lámina elástica de aire; una parte del aire que sale choca contra el labio *l'* y forma una compresión en la parte inferior

del tubo *D*, la que se propaga hacia arriba, se refleja en el extremo superior y al llegar reflejada a *C* le da un choque a la lámina elástica; pero ésta, debido a su propia elasticidad, efectúa una oscilación de igual modo que una lámina metálica; lanza nuevas ondas longitudinales que vuelven a reflejarse y la interferencia de las ondas directas y reflejadas produce un estado estacionario.

Si el tubo está cerrado, en el extremo superior se produce un nodo y abajo un vientre, puesto que allí, por estar abierto el tubo, no pueden producirse compresiones ni depresiones (fig. 43, 1); el largo *l* del tubo equivale entonces a la cuarta parte de una onda (para su sonido fundamental):

$$l = \frac{\lambda_1}{4} \text{ y } n_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4l}$$

**50. Experimento:** Soplemos por el pie de un tubo de boca, primero suavemente y después con fuerza. ¿Varía el sonido?

Al soplar con más fuerza resulta un sonido más agudo que solamente se explica por la subdivisión de la columna vibrante; a causa de

la mayor velocidad del aire que sale por *C*, la lámina de aire adquiere mayor elasticidad y vibra más ligero produciendo ondas de menor longitud. Debiendo conservarse un nodo arriba y un vientre abajo no hay otra posibilidad que la formación por lo menos de un vientre y un nodo al medio (fig. 43, 2) el largo  $l = \frac{3}{4} \lambda_2$  y  $n_2 = \frac{3v}{4l}$

$= 3n_1$ . Una nueva subdivisión produciría 3 nodos y 3 vientres (fig. 43, 3):  $l = \frac{5}{4} \lambda_3$ ,  $n_3 = \frac{5v}{4l} = 5n_1$ .

**En un tubo cerrado se forman los sonidos armónicos, cuyos números de oscilaciones son proporcionales a los números impares.**

**51. Experimento:** Soplemos suavemente por el pie de un tubo cuyo extremo está cerrado y abrámoslo mientras suena. ¿Qué intervalos tienen los sonidos que produce?

El sonido del tubo abierto es la octava aguda del que produce el mismo tubo estando cerrado.

Si el tubo está cerrado, el sonido fundamental corresponde a un nodo arriba y un vientre abajo, con  $n_1$  oscilaciones por seg; si está abierto tienen que producirse vientres en sus dos extremos y un nodo al medio, resultando  $n_2$  oscilaciones por segundo. Resulta:

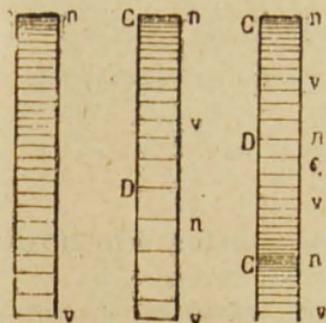


Fig. 43



Fig. 42

$$l = \frac{\lambda_1}{4} \text{ y } n_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4l} \quad ; \quad l = \frac{\lambda_2}{2} \text{ y } n_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{2l} = 2 n_1.$$

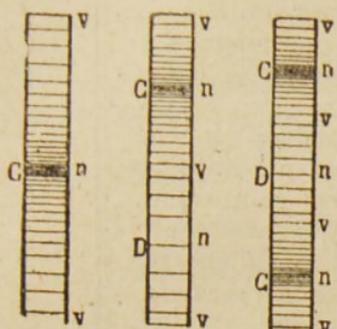


Fig. 44

52. Experimento: Soplemos suavemente por el pie de un tubo abierto y después con fuerza.

El segundo sonido es más agudo que el primero.

El primer sonido corresponde a un vientre en cada extremo y un nodo al medio (fig. 44,1) (sonido fundamental):

$l = \frac{\lambda_1}{2}$ ,  $n_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2l}$ . El segundo a 3

vientres y 2 nodos (fig. 44,2):  $l = \lambda_2$ ,

$n_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{l} = 2n_1$ . El tercero a 4

vientres y 3 nodos (fig. 44, 3):  $l = \frac{3\lambda_3}{2}$ ,  $n_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{3v}{2l} = 3n_1$ .

En un tubo abierto se forman todos los sonidos armónicos.

53. Experimento: Hagamos sonar tubos de igual longitud pero de distinta sección y naturaleza y comparemos sus sonidos.



Fig. 45

Las notas que dan son iguales. La altura del sonido depende únicamente de la longitud del tubo. En todo caso es el aire el que vibra y como el sonido se propaga en él con igual velocidad, resulta de las fórmulas tantas veces aplicadas que **los números de vibraciones de los sonidos que producen dos tubos son inversamente proporcionales a las longitudes de sus columnas de aire.**

54. Experimento: Hagamos sonar un tubo provisto de un émbolo que lo recorre interiormente.

El tubo da el sonido más bajo cuando el émbolo está en el extremo del tubo y el sonido se hace más y más agudo a medida que el émbolo acorta la columna de aire que vibra. Se obtienen infinitos sonidos diferentes y pueden marcarse en el émbolo los puntos hasta los cuales debe introducirse el émbolo para que resulten los sonidos de la escala diatónica mayor.

La teoría anterior puede comprobarse experimentalmente haciendo ver los nodos y vientres que se producen en un tubo sonoro y cómo varían si se produce otra nota por subdivisión de la columna de aire que vibra en ellos.

Sabemos que en los tubos sonoros las ondas son longitudinales y, por consiguiente, en los nodos se producen compresiones y depresiones alternativamente, sin movi-

miento alguno del aire; en los vientres el aire pasa rápidamente en uno y otro sentido. Si se introduce en el tubo un marquito con una membrana que contiene arena, ésta saltará violentamente en los vientres y su movimiento decrecerá hasta quedar casi en reposo en los nodos. La membrana se hace subir o bajar sosteniéndola por medio de un hilo. El tubo que se emplea debe ser de vidrio para ver la arena (fig 45).

**55. Experimento:** Hagamos subir y bajar la membrana con arena en el tubo abierto mientras se sopla suavemente (sonido fundamental) y después soplando con más fuerza (1.<sup>er</sup> sonido armónico). ¿Dónde están los nodos y los vientres?

En el primer caso el movimiento de la arena es muy vivo en ambos extremos y disminuye hasta casi desaparecer al medio; hay, pues, vientres en los extremos y un nodo al medio para el sonido fundamental; en el segundo caso, primer sonido armónico, se encuentran vientres en los extremos y exactamente al medio y nodos entre ellos.

### Tubos de lengüeta.

El aire entra por el pie a la cámara A (fig. 46) y no tiene otra salida que la de la **cánila** B, que puede cerrarse por la lámina metálica elástica *c* que se encuentra frente a la abertura y que se denomina **lengüeta**. El aire actúa sobre la lámina, la aleja de su posición y por su elasticidad ésta ejecuta oscilaciones rápidas, cerrando y abriendo sucesivamente la cánila. De este modo se producen en el aire de la cánila compresiones y depresiones que se propagan en forma de ondas sonoras hasta el observador.

**56. Experimento:** Igualemos el sonido de un tubo de lengüeta con el de una cuerda; reemplacemos la lengüeta por otra de doble grueso y determinemos el intervalo entre este sonido y el anterior.

El nuevo sonido es la octava aguda del anterior.

**57. Experimento:** Igualemos el sonido de un tubo de lengüeta con el de una cuerda; en seguida acortemos, aprovechando el alambre *d*, la longitud de la lengüeta hasta que equivalga a la  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  de su largo anterior. Comparemos los dos sonidos.

El segundo sonido es la tercera del anterior.

Comparando estos experimentos con los números 41 y 42, comprobaremos que rigen para las lengüetas las mismas leyes que para las varillas.

El alambre *d* (fig. 46) puede servirnos para afinar el tubo sonoro variando el largo de la lengüeta. Para aumentar la intensidad

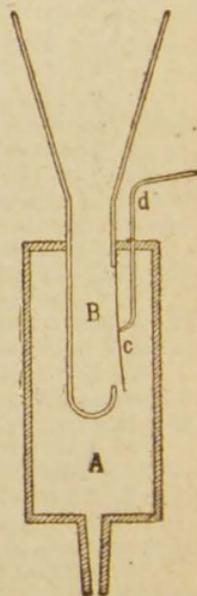


Fig. 46

de los sonidos podemos colocarle tubos cónicos a la salida de la cánila, de modo que las vibraciones de la lengüeta se transmitan al aire de dicho tubo.

¿Influye la longitud de dicho tubo en la altura del sonido?

**58. Experimento:** Hagamos funcionar el tubo de lengüeta cambiándole tubos cónicos de distintas longitudes. ¿Cambia el sonido?

Con algunos tubos el sonido no varía, pero con otros se hace más bajo. En los últimos casos, el aire del tubo adquiere una duración propia de oscilación y obliga a las vibraciones de la lámina a seguir su compás, variando la altura del sonido que le corresponde a las dimensiones de la lengüeta.

### Preguntas.

- 1) ¿Según qué leyes se producen en el violín los diferentes sonidos?
- 2) ¿Qué influencia tiene la temperatura sobre los sonidos que producen los instrumentos con cuerdas metálicas?
- 3) ¿Cómo se producen los distintos sonidos de una flauta, de un piano, de un órgano, de un acordeón, de una música de boca?
- 4) ¿Cómo se afinan los pianos y violines?
- 5) ¿Cómo se produce un silbido?
- 6) ¿Cómo se explica el sonido que se produce algunas veces en los tubos de las lámparas cuando se las enciende?

### Problemas.

- 1) Una cuerda de 1 [m] de largo da la nota  $Do_2$ . ¿Dónde hay que poner el puente para que dé la nota  $La_4$ ?
- 2) Una cuerda de 0,5 [mm] de diámetro que está tendida por una fuerza de 9 [kg-p] da la nota  $Fa_2$  que hace 174 oscilaciones por segundo. ¿Qué diámetro debería tener la cuerda para que diera la nota  $Do_3$ ? ¿Qué tensión deberíamos aplicarle para que diera la nota  $La_3$ ?
- 3) Si una cuerda se acorta 10 [cm] da la nota  $Mi_2$  y si se le acorta otros 2,5 [cm] da la nota  $Fa_3$ . ¿Qué largo tiene la cuerda y qué sonido da?
- 4) Cuatro varillas de igual naturaleza y sección tienen longitudes de 20, 30, 40 y 50 [cm] y están fijas por un extremo. ¿Qué notas dan, vibrando transversalmente, si la menor da la nota  $Do_4$ ?
- 5) Una varilla cuyo grueso es de 2 [mm] da la nota  $Mi_3$ . ¿Qué grueso deberá tener una varilla de la misma substancia y del mismo largo para que dé la nota  $Do_4$ ? ¿Qué largo habría que darle a ésta para que diera la misma nota anterior?
- 6) ¿Qué largo debe tener la columna de aire de un tubo sonoro, abierto, para que dé la nota  $Do_3$ ?
- 7) Un tubo de boca de 32,57 [cm] de largo tiene un émbolo que permite acortarlo. ¿Cuántos cm tiene que penetrar el émbolo para que produzca la tercera de la nota que le corresponde a toda su longitud?
- 8) ¿Cuáles son los sonidos armónicos de un tubo abierto cuyo largo es de 39,1 [cm]?

## La Resonancia. Resonadores.

### Análisis del sonido.

**59. Experimento:** Afinemos dos cuerdas del sonómetro de modo que den la misma nota; hagamos vibrar una de ellas y detengámosla después. ¿Continúa el sonido? Repitémoslo poniendo jinetes de papel sobre la segunda cuerda. ¿Qué sucede?

Cuando se detiene la primera cuerda, el sonido continúa oyéndose; después apenas comienza a vibrar la primera cuerda, se caen los jinetes de la segunda, lo que prueba que ésta vibra sin que se la haya tocado.

**60. Experimento:** Pongamos dos diapasones iguales frente a frente, hagamos sonar uno de ellos y detengámoslo después. ¿Se oye siempre el sonido? Repitamos el experimento haciendo que una bolita colgada de un hilo toque el segundo diapasón.

Después que se detiene el primer diapasón, el sonido persiste. En seguida vemos que la bolita vibra, lo que nos indica que el segundo diapasón vibra sin que lo hayamos tocado.

Si cantamos una nota frente a un piano abierto, la cuerda que da la misma nota queda vibrando.

Este fenómeno es la **resonancia**.

**Resonancia es la propiedad de algunos cuerpos** (diapasones, cuerdas, etc.) **de sonar si en su cercanía se produce el mismo sonido que ellos pueden producir.** ¿Bajo qué condiciones se produce la resonancia?

**61. Experimento:** Repitamos el experimento 59, desafinando las cuerdas.

En este caso no se produce la resonancia. La condición esencial es que las cuerdas estén afinadas para producir exactamente la misma nota.

Al oscilar la primera cuerda lanza compresiones y depresiones que van a chocar con la otra. Si las cuerdas están afinadas para dar la misma nota, la primera compresión que llega da un pequeño impulso a la segunda cuerda; debido a su elasticidad vuelve atrás y en el momento preciso en que comienza su movimiento hacia adelante llega la nueva compresión y le agrega un nuevo impulso que le aumenta la amplitud de su oscilación y luego llegan de igual modo la tercera, la cuarta y toda una serie de compresiones; si entonces se detiene la primera cuerda, la segunda queda oscilando; se ha producido la resonancia.

Si las cuerdas no tienen igual duración de oscilaciones, sucederá que después del primer impulso, debido a la primera compresión, llegará la segunda a destiempo y se anulan por completo o en parte y lo mismo sucederá con las siguientes. Las amplitudes no crecerán lo suficiente para hacer vibrar la cuerda a tal punto que se produzca la resonancia.

Igual cosa sucede con los diapasones.

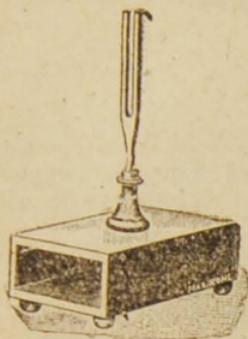


Fig. 47

**62. Experimento:** Hagamos vibrar un diapason que sostenemos en la mano y coloquémoslo vibrando sobre la **caja sonora** que le corresponde (fig. 47). ¿Qué sucede?

Al principio, el sonido del diapason casi no se oye; pero tan luego como se afirma en la caja el sonido adquiere gran intensidad. ¿Por qué?

Las vibraciones del diapason se transmiten por su pie a la tapa de la caja y ésta vibra haciendo vibrar tambien al aire que contiene, de modo que oscilan tres cuerpos en vez de uno y las ondas de los tres se juntan y llegan sumadas al oído.

Igual cosa sucede con las cuerdas y por eso se las coloca sobre una caja.

**63. Experimento:** Repitamos el experimento anterior, pero empleando la caja sonora de otro diapason que no da igual nota.

En este caso el sonido aumenta muy poco de intensidad.

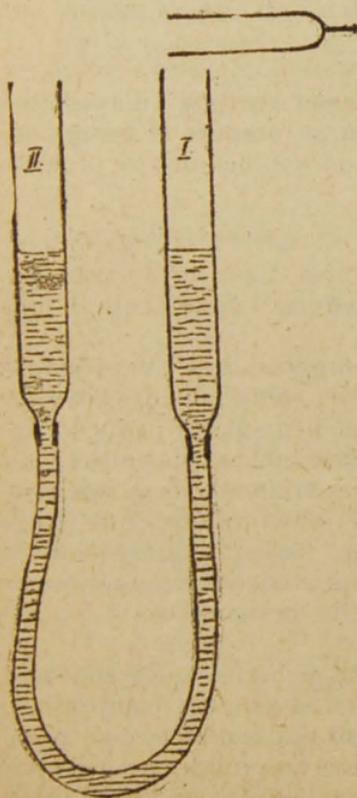


Fig. 48

**64. Experimento:** Frente a la boca de uno de dos vasos comunicantes, unidos por una manguera y que contienen agua (fig. 48) coloquemos un diapason de nota  $La_3$  vibrando y, estando casi lleno el tubo I, bajemos el tubo II y observemos el momento en que el sonido llega a su intensidad máxima; midamos el largo de la columna de aire que produce dicha intensidad máxima y comparémosla con el largo de la columna de aire de la caja sonora correspondiente.

El sonido adquirirá su mayor intensidad cuando la columna de aire mide 19,5 [cm], igual longitud que la de la caja sonora.

La caja sonora debe tener, como se ve, una longitud bien determinada para que resuene; para que esto suceda debe formarse en ella un estado estacionario, lo que se consigue en el caso más sencillo con la formación de un vientre en el extremo abierto y un nodo en el cerrado; el largo del tubo es  $l = \frac{1}{4} \lambda$ ; sabemos que al sonido  $La_3$  le corresponde una onda de longitud  $\lambda = 78,2$  [cm] (véase pág. 46), de modo que  $l = \frac{78,2}{4} = 19,55$  [cm].



**66. Experimento:** Hagamos sonar un tubo abierto de boca, que dé la nota  $D_{03}$ , y veamos que resonadores resuenan con él.

Resuenan los resonadores que dan las notas  $D_{02}$  y sus sonidos armónicos; el tubo que estudiamos no da la nota pura  $D_{03}$ , sino mezclada con sus sonidos armónicos y de aquí proviene su timbre.

Por el mismo procedimiento pueden examinarse los sonidos que produce cualquier instrumento musical, apartando los resonadores que resuenan y viendo después las notas a las cuales corresponden y que están marcadas en ellos. Así se ha comprobado que todos los sonidos, a excepción de los producidos por los diapasones, son compuestos y que los sonidos armónicos que acompañan a los fundamentales varían en los diversos instrumentos y de ello deriva su timbre que nos permite distinguir, por ejemplo, una nota producida por una flauta de otra exactamente igual producida por un violín o por la voz.

### La interferencia de los sonidos.

Vamos a comprobar los efectos de la interferencia de las ondas sonoras aprovechando el aparato siguiente: dos tubos  $A$  y  $B$  (fig. 50) están comunicados por dos secciones curvas, una de las cuales,  $C$ ,

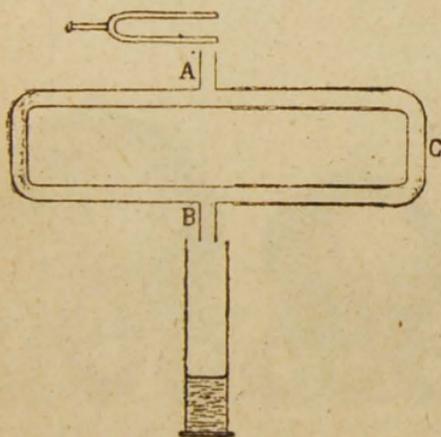


Fig. 50

ajusta en la otra y puede alargarse hasta cierto límite; si se hace sonar un diapasón frente al tubo  $A$ , las ondas sonoras se propagan por ambos tubos y van a juntarse en  $B$ , por donde salen. Frente a  $B$ , se coloca una columna de aire que resuene con el diapasón que se emplea, de modo que el sonido pueda oírse a la distancia.

**67. Experimento:** Igualemos las dos ramas del aparato recién descrito (fig. 50) y hagamos vibrar el diapasón  $La_3$ . ¿Se oye algún sonido? Alarguemos después la rama  $C$  mientras vibra el diapasón. ¿Qué se observa?

Al principio, el sonido se oye con bastante intensidad, pero a medida que se alarga la rama  $C$  se apaga poco a poco para aumentar de intensidad después; se suceden, pues, máximos y mínimos de intensidad.

**68. Experimento:** Repitamos el experimento anterior y midamos los aumentos de longitud de la rama  $C$  que producen mínimos y máximos.

Los mínimos corresponden a aumentos de longitud de 39,1 [cm] y de 117,3 [cm]; y los máximos a aumentos de 78,2 y 156,4 [cm]; los mínimos se producen para aumentos equivalentes  $\frac{1}{2} \lambda$  y  $\frac{3}{2} \lambda$ ; los máximos a  $\lambda$  y  $2 \lambda$ .

¿Cómo explicar estos cambios de intensidad?

Si las dos ramas son iguales, las compresiones producidas por el diapasón se bifurcan en *A*, pero, por tener que recorrer caminos iguales, llegan al mismo tiempo a *B* y salen juntas haciendo resonar la columna de aire de la probeta, produciendo un estado estacionario. Si la rama *C* se alarga precisamente en  $\frac{1}{2} \lambda = 39,1$  [cm] o en  $\frac{3}{2} \lambda = 117,3$  [cm] llegan a *B* una compresión por la izquierda y una depresión por la derecha, ambas se anulan y el sonido desaparece por no poderse formar el estado estacionario en el aire de la probeta. Si la rama *C* se alarga en  $\lambda = 78,2$  [cm] o en  $2 \lambda = 156,4$  [cm], llegan a *B* juntas las compresiones y juntas también las depresiones, sus efectos se suman, se produce el estado estacionario y se oye la intensidad máxima.

Se anulan dos ondas si su diferencia de fase es igual a  $\frac{1}{2} \lambda$ ,  $\frac{3}{2} \lambda$ ,  $\frac{5}{2} \lambda$ , ... y se suman si su diferencia de fase es igual a  $\lambda$ ,  $2 \lambda$ ,  $3 \lambda$ , ... lo que está completamente de acuerdo con la teoría desarrollada en la página 31.

**69. Experimento:** Hagamos sonar simultáneamente dos diapasones iguales; en seguida repítámoslo colocándole a una rama de uno de ellos un pequeño cuerpo pesado. ¿Qué diferencia se produce?

Al principio los dos diapasones producen un solo sonido; después la intensidad del sonido sufre variaciones rápidas entre máximos y mínimos, que han recibido el nombre de **pulsaciones**.

**70. Experimento:** Repitamos el experimento anterior moviendo el cuerpo pesado a lo largo de la rama del diapasón desde cerca del pie hasta el extremo. Veamos si el número de pulsaciones crece o decrece.

A medida que el cuerpo pesado se acerca al extremo libre, el número de vibraciones del diapasón disminuye y la diferencia del número de vibraciones de los diapasones aumenta. El número de pulsaciones crece también, de modo que tiene que existir una relación íntima entre el número de pulsaciones y la diferencia del número de vibraciones de los dos diapasones.

**71. Experimento:** Hagamos sonar dos tubos sonoros de igual nota alargando un poco uno de ellos por medio de un agregado de cartón; igualmente dos cuerdas que dan notas casi iguales. Obsérvense las pulsaciones.

¿Cómo se explican estas pulsaciones? Supongamos que uno de los instrumentos haga 102 y el otro sólo 100 vibraciones. Al principio su estado de oscilación es el mismo y hacen llegar al mismo compás depresiones y compresiones al oído que recibe una impresión bastante intensa; pero ya después de  $\frac{1}{4}$  de seg el primero ha efectuado 25 y el segundo  $25\frac{1}{2}$  oscilaciones y el estado de oscilación de los dos diapasones se distingue en media onda, de modo que llegan al mismo tiempo al oído la depresión del uno y la compresión

del otro, que se anulan y no oímos ningún sonido. Después de  $\frac{1}{2}$  [seg] el primero ha efectuado 50 y el segundo 51 oscilaciones y el estado de oscilación de los diapasones se distingue en 1 onda, de modo que otra vez llegan al mismo tiempo compresiones de los dos, dando un sonido intenso. Después de  $\frac{3}{4}$  [seg] el primero ha efectuado 75 y el segundo  $76\frac{1}{2}$  oscilaciones y como el estado de oscilación se distingue en  $\frac{3}{2}\lambda$ , tienen que anularse las ondas y tenemos silencio, y por fin después de 1 [seg] el estado de oscilación es el mismo, las ondas se suman y nos dan un sonido intenso. Vemos que el valor de la intensidad pasa dos veces a 0, lo que corresponde a 2 pulsaciones y si formamos la diferencia de los números de oscilaciones resulta también 2, igual al número de pulsaciones. Esta ley es general. **Siempre el número de pulsaciones por segundo es igual a la diferencia de los números de vibraciones de los sonidos.**

En la práctica se aprovechan las pulsaciones para afinar los diapasones, tubos o cuerdas, variando la altura de un sonido hasta que desaparezcan las pulsaciones.

Si el número de pulsaciones pasa de 16, su conjunto produce en nosotros la sensación de un sonido y por este motivo tiene que percibirse un tercer sonido si se producen dos, y cuyo número de oscilaciones es igual a la diferencia de los números de oscilaciones de los sonidos. Un violinista, **Tartini**, descubrió primero estos sonidos y por este motivo se les llama sonidos de Tartini.

## La voz humana.

Después de haber estudiado las propiedades de los sonidos y los instrumentos musicales, vamos a hacer una aplicación de estos conocimientos a la voz humana.

¿Cómo producimos nosotros los sonidos y les damos intensidad, altura y timbre distintos?

El aire que sale de los pulmones por la traquearteria debe pasar por una hendidura formada por dos membranas elásticas llamadas **cuerdas vocales** y que están unidas con cartílagos que pueden alejarse o acercarse por medio de músculos, dando a las membranas una tensión mayor o menor.

Expulsando con cierta fuerza el aire, las membranas se alejan de su posición de equilibrio y por esto adquieren un movimiento oscilatorio cerrando y abriendo rítmicamente la salida del aire, de modo que se forman alternativamente compresiones y depresiones que al llegar al oído producen la sensación de un sonido. Si queremos aumentar la intensidad, expulsamos el aire con más fuerza, alejando más las cuerdas vocales, por lo que aumenta la amplitud de las oscilaciones.

Los sonidos de mayor altura se producen tendiendo más las cuerdas, dándoles una elasticidad mayor aumentando así el número de sus vibraciones.

Podemos dar timbres distintos al mismo sonido, timbres que corresponden a las vocales.

**Helmholtz**, analizando un sonido humano, encontró que está acompañado también de varios sonidos armónicos.

Mientras que en la vocal *u* casi exclusivamente se oye el sonido fundamental, en la vocal *o* se le agrega la octava y en las *a*, *e*, *i*, otros sonidos armónicos más agudos.

Según la magnitud y la forma que se da a la cavidad de la boca, podemos reforzar uno o más de estos sonidos, puesto que la cavidad bucal actúa como resonador. Por ejemplo, dando a la boca sucesivamente la posición que corresponde a las vocales *a* y *o* y acercándole un diapasón que da el sonido  $Si_3$ , resuena fuertemente el aire contenido en la boca, en la vocal *o*, pero no en la *a*; si acercamos un diapasón  $Si_4$  en el último caso, resuena. De esto resulta que  $Si_3$  es el sonido característico para la vocal *o* y  $Si_4$  para la *a*. De la misma manera encontramos que a la vocal *e* le corresponden los sonidos  $Si_5$  y  $Fa_3$  y a la vocal *i* los sonidos  $Re_6$  y  $Fa_2$ .

Las consonantes son ruidos producidos por los labios, la lengua y el paladar.

### Fonógrafo de Edison.

Este aparato nos permite fijar los sonidos pronunciados y reproducirlos cuantas veces queramos.

Consiste en un cilindro de cera (figs. 51 y 52), delante del cual se encuentra colocada una embocadura

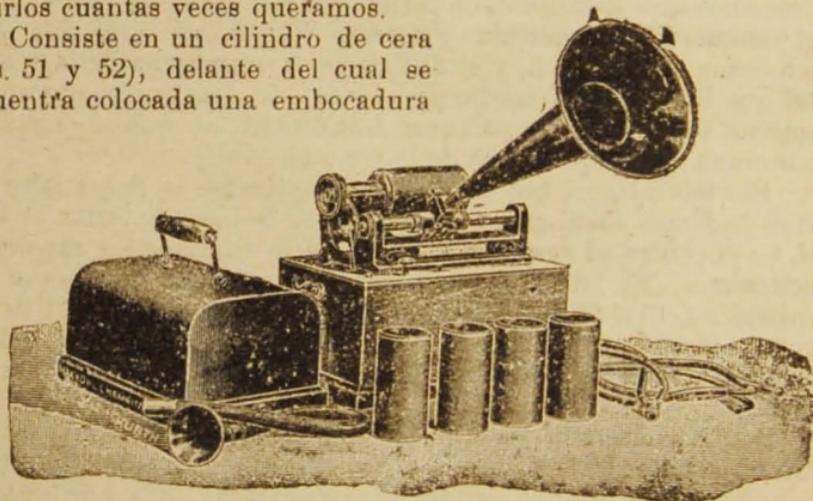


Fig. 51

A cerrada por una lámina vibrante *d* que se apoya sobre un estilete de acero *c*, sostenido por una lámina flexible y que toca al cilindro.

Dispuesto así el aparato, se habla delante de la embocadura haciendo girar el cilindro al mismo tiempo con un movimiento uniforme.

A consecuencia de las vibraciones de la membrana, el estilete penetra más o menos en la cera.

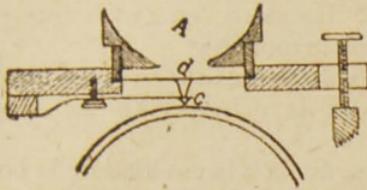


Fig. 52

Si se quieren repetir los sonidos es preciso levantar la embocadura y colocar el cilindro en su posición inicial. El estilete al pasar por las distintas impresiones penetra más o menos según la profundidad de ellas y obliga a la membrana a ejecutar las mismas oscilaciones que le causaron las ondas sonoras, por lo que reproducen las mismas palabras pronunciadas.

laciones que le causaron las ondas sonoras, por lo que reproducen las mismas palabras pronunciadas.

## El oído humano.

En el oído humano distinguimos: el oído externo, medio e interno.

El oído externo se compone del **pabellón** que sirve para recoger la mayor cantidad posible de ondas sonoras que se concentran en el **conducto auditivo** para poder actuar con mayor fuerza sobre la **membrana del tímpano**. Por medio de la membrana se transmiten las ondas sonoras al oído medio, que consiste en una serie de 4 huesecillos que, a causa de la forma que tienen, se les llama: **martillo, yunque, hueso lenticular** y **estribo**. El primero está fijo en la membrana del tímpano, y el último en la **membrana de la ventana oval** que limita el oído medio por el otro lado. Los huesos que actúan como un mecanismo de palancas transmiten las oscilaciones de la membrana del tímpano a la de la ventana oval.

El oído interno, por su forma complicada, se llama **laberinto**. En él podemos distinguir 3 cavidades: en la parte inferior el **caracol**, en el centro el **vestíbulo** y en la parte superior los **canales semicirculares**. El laberinto está tapizado por una membrana que consiste en 15 a 20 000 fibras muy finas, de longitudes distintas, cuyos extremos están en comunicación con las ramificaciones del nervio acústico por otras fibras muy finas llamadas fibras de **Corti**.

Según Helmholtz, cada fibra actúa como un pequeño resonador para un sonido bien determinado y es sorda para todos los demás, de modo que un sonido simple no hace vibrar más que una sola fibra, mientras que un sonido compuesto excita tantas como sonidos componentes haya.

Las oscilaciones de la ventana oval se transmiten al líquido gelatinoso que contiene el laberinto y cuando se trata de un sonido simple se excita una sola fibra, mientras que el movimiento complicado de la membrana producido por un conjunto de sonidos, se transmite mediante el líquido a las fibras que le corresponden y és-

tas excitan los extremos correspondientes del nervio acústico y producen en nosotros la sensación del sonido.

### Preguntas.

- 1) ¿Qué ventaja tiene que el hueso del oído, llamado martillo, esté en el centro del tímpano?
- 2) ¿Se puede oír si se rompe el tímpano.
- 3) ¿Por qué son tan diferentes las voces del hombre, de la mujer y del niño?
- 4) ¿Por qué los artilleros abren la boca al disparar con los grandes cañones?
- 5) ¿Por qué resuena solamente una cuerda del piano si frente a ellas (abierto el piano) suena un diapasón? ¿Sucede lo mismo si en vez del diapasón suena un tubo sonoro?

### Problemas.

- 1) Dos diapasones que suenan juntos dan 10 pulsaciones por segundo. Si el más bajo da una nota equivalente a la de un tubo sonoro cerrado, de 40 [cm] de largo ¿qué nota da el más agudo?
- 2) Dos sonidos cuyo intervalo es  $\frac{3}{2}$  dan 6 pulsaciones por segundo: el más agudo es el primer sonido armónico de un tubo abierto. ¿Qué largo tiene este tubo?
- 3) ¿Qué largo debe tener una caja sonora que refuerce el sonido de un diapasón cuya nota es *Sol*<sub>2</sub>? ¿Qué otros sonidos se refuerzan por esta misma caja?

## Calor.

En el estudio de los fenómenos del calor partimos de las sensaciones que nos causa un cuerpo al tocarlo y según éstas designamos su estado de calor por las palabras frío, tibio o caliente. Tocando un segundo cuerpo podemos cerciorarnos si su estado de calor o, como decimos en Física, su **temperatura** es igual o distinta. Las pequeñas diferencias de temperatura escapan, sin embargo, a nuestras sensaciones y no nos permiten hacer observaciones exactas. Por este motivo tenemos que recurrir a otro medio y lo encontramos en los efectos físicos que produce el calor en los cuerpos y especialmente en la dilatación. Veremos que ésta basta perfectamente para medir las más pequeñas diferencias de temperatura.

## Dilatación.

72. Experimento: Calentemos una bola de metal que pasa ajustadamente por un anillo del mismo metal (fig. 53) coloquémola sobre él y veamos si todavía pasa.

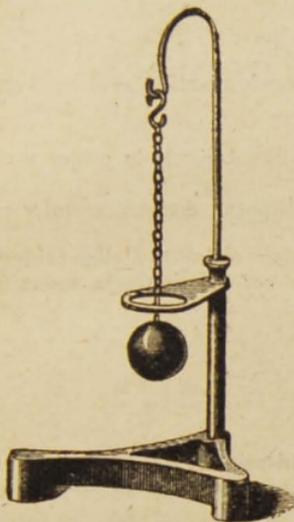


Fig. 53

Al colocarla sobre el anillo de metal la bola no pasa y cae cuando se ha enfriado.

73. Experimento: Calentemos simultáneamente la bola y el anillo y veamos si ahora pasa la bola.

La bola pasa fácilmente.

Estos experimentos nos hacen ver que los cuerpos sólidos se **dilatan** por el calor y que los cuerpos huecos y los anillos se dilatan siempre hacia afuera. Al enfriarse se **contraen**.

74. Experimento: Proveámonos de un matraz grande que termine en un tubo largo y estrecho y echémosle agua coloreada para hacerla más visible y marquemos bien su nivel (fig. 54). Sumerjamos este matraz en agua caliente observando atentamente el nivel.

Éste baja al principio, pero sube después hasta cierta altura mayor que la inicial.

En el primer momento se calienta el matraz y, dilatándose, aumenta su capacidad, lo que produce el descenso del nivel, pero luego se transmite el calor a través del vidrio al líquido y éste se dilata, subiendo el nivel.

El descenso del nivel no se ha debido por consiguiente, a contracción sino a la rápida dilatación del matraz.

Los líquidos, como se ve, también se dilatan al calentarse.

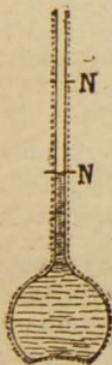


Fig. 54

75. Experimento: Tomemos un matraz no muy grande provisto de un tubo estrecho acodado en ángulo recto (fig. 54). Sumerjamos su extremo en un líquido coloreado y tomemos el matraz con la mano.

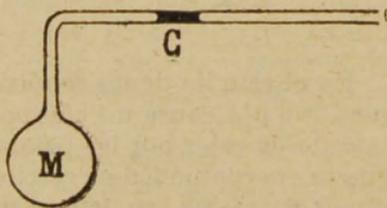


Fig. 55

Casi inmediatamente el aire del matraz sale formando burbujas a través del líquido; si retiramos la mano del matraz, el líquido entra en el tubo, empujado por la presión atmosférica, y, sacando el extremo del líquido, se forma un índice (fig. 55).

Al calentarse el aire del matraz por el calor de la mano, se dilata, empujando el índice hacia afuera; al enfriarse después, se contrae y el índice se mueve hacia adentro.

Los gases se dilatan por el calor.

De las experiencias anteriores se deduce que **todos los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos, se dilatan por el calor; que los líquidos se dilatan más que los sólidos y las gases más que ambos.**

## Termómetros.

Habiendo visto que todos los cuerpos se dilatan, es necesario buscar una relación entre el estado de calor de los cuerpos y sus dilataciones. Es claro que un cuerpo se dilata más cuando se le toca con un cuerpo más caliente y se ve que es posible juzgar del estado de calor de éste por la dilatación que produce. Los instrumentos que sirven para medir el estado de calor de los cuerpos se llaman **termómetros**, y se pueden usar para construirlos cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos. Los que más se emplean son los líquidos y entre éstos el mercurio.

**76. Experimento:** Construyamos un termómetro de mercurio. Tomemos un tubo capilar muy bien calibrado que tenga un pequeño matraz en un extremo y algo así como un embudo en el otro (fig. 56) y un poco de mercurio muy puro y seco.

Echemos mercurio en el embudo; vemos que entra un poco en el tubo, pero no llega al matraz porque el aire, que no puede salir debido a la estrechez del tubo, se comprime de acuerdo con la ley de Mariotte y lo impide. Calentamos el matraz; el aire se dilata y sale a través del mercurio lo que se facilita inclinando el tubo. Dejemos enfriar el matraz en seguida: el aire se contrae y el mercurio entra empujado por la presión atmosférica; como el mercurio todavía no llena el matraz volvamos a calentarlo, pero esta vez hasta que hierva; sus vapores expulsan al salir todo el aire del matraz; al enfriarse se condensan los vapores y el mercurio llena el vacío que dejan.

Antes de cerrar el tubo, se calienta el mercurio hasta que lo llene, desalojando el aire que contiene y se cierra al soplete. Para poder medir la temperatura de un cuerpo es necesario definir una unidad. Para obtenerla se coloca el termómetro en hielo fundente y se marca el punto donde el mercurio permanece constante durante mucho tiempo. Este punto se designa por cero ( $0^{\circ}$ ).

Después se expone el termómetro a los vapores del agua hirviente; el mercurio sube y se fija en cierto punto. Si en tal momento la presión atmosférica es igual a 760 [mm], designamos este punto por  $100^{\circ}$ . El aparato que se usa para esta determinación es un vaso *B* (fig. 57) colocado sobre el otro *A*, que contiene agua. Un tubo más ancho *C*, rodea al primero y tiene una abertura que permite la salida del vapor a la atmósfera. El termómetro se encuentra en el interior del tubo angosto bañado en los vapores, pero sin to-

car el agua. Después de determinar estos dos puntos, que se llaman también **puntos fijos** se divide el espacio que hay entre ellos en 100 partes iguales y cada una de estas partes se llama **un grado centígrado**. Podemos dar para el grado la siguiente definición:

**Grado** es la centésima parte de la dilatación que experimenta el mercurio en el tubo termométrico cuando la temperatura varía desde la del hielo fundente hasta la del agua hirviendo a la presión normal.

La escala anterior puede prolongarse más abajo de cero (bajo cero) y más arriba de 100°.

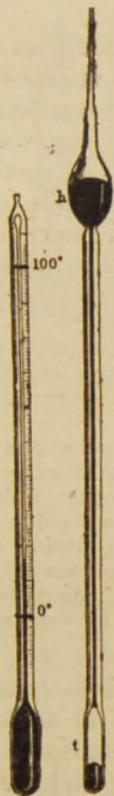


Fig. 56

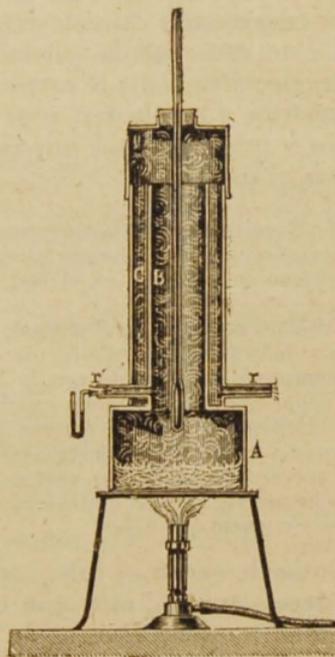


Fig. 57

Para distinguir la escala termométrica que acabamos de describir, de otras que existen, se la llama **escala centígrada** o de **Celsius** y es la única que se usa en Física.

En Inglaterra y Norte América, se emplea otra escala, la de **Fahrenheit**, muy distinta de la anterior; el punto 0 se obtiene por una mezcla frigorífica de hielo y sal amoníaco en partes iguales y el punto superior por la ebullición del agua a la presión normal, escribiéndose allí 212°. En esta escala al 0 de la centígrada le corresponde 32°.

Muchas veces es necesario reducir las temperaturas expresadas en una escala a la otra y para esto vamos a buscar una relación matemática entre las dos escalas.

A 100° Celsius corresponden en magnitud (212—32°) Fahrenheit (fig. 58) y si tomamos cualquiera temperatura  $t_c$  a la cual corresponde  $t_f$  en la escala de Fahrenheit, resulta la relación:

$$\frac{t_c}{t_f - 32} = \frac{100}{212 - 32}$$

$$(17) \quad t_c = \frac{5}{9} (t_f - 32).$$

**Ejemplos:** Reducir 68° F a grados Celsius.

Aplicamos (17)  $t_c = \frac{5}{9} (68 - 32)$ ;  $t_c = 20^\circ \text{ C}$ .

Reducir 25° C a grados Fahrenheit.

Aplicamos la ecuación (17):  $25 = \frac{5}{9} (t_f - 32)$ ;  $t_f = 77^\circ \text{ F}$ .

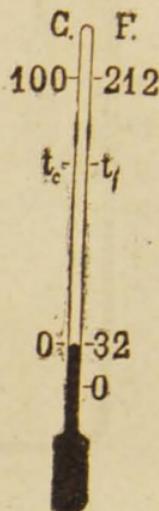


Fig. 58

Los termómetros de mercurio sólo sirven para medir temperaturas que varían entre 39° bajo cero (temperatura a la cual se solidifica el mercurio) y 300° sobre cero (a la cual se evapora en el vacío). Cuando se desea medir temperaturas más bajas; se emplean termómetros de otros líquidos: el toluol permite medir temperaturas hasta—100° y el éter de petróleo más bajas que—200°. Para las mayores a+300° se usa otra clase de termómetros que conoceremos después.

### Termómetro de máxima y mínima.

Muchas veces se desea conocer la temperatura más alta del día (temperatura máxima) y la más baja (mínima). Para evitar la observación permanente del termómetro, se ha ideado el termómetro de máxima y mínima que deja constancia por sí solo de dichas temperaturas.

Un modelo muy usado es el siguiente: un tubo capilar en forma de U (fig. 59) termina en 2 matraces; la parte inferior del tubo contiene mercurio, el resto, alcohol, que llena por completo uno de los matraces A, y deja una parte desprovista de aire en el otro B. Para graduarlo se sumerge el aparato en hielo fundente y se anota 0 en ambos niveles del mercurio; después se introduce en

agua a 50° y se anotan los

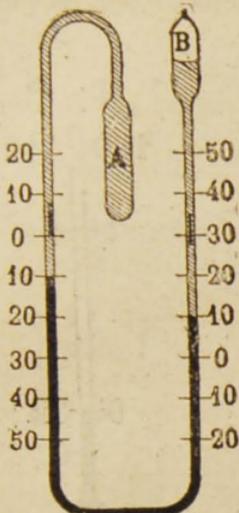


Fig. 59

2 puntos 50. Las longitudes entre los puntos 0 y 50 se dividen en 50 partes iguales y se prolongan las escalas para obtener temperaturas bajo cero. Sobre ambas columnas de mercurio se colocan dos pequeños índices de acero. Cuando la temperatura baja se contrae el alcohol en A y el mercurio sube en la rama izquierda del tubo empujando el índice hacia arriba; cuando empieza después a subir la temperatura, se dilata el alcohol y el mercurio se mueve en sentido contrario, abandonando el índice de que hablamos, el que marcó la temperatura mínima; pero esta vez empuja el otro índice en la rama derecha hasta que cesa la dilatación, y lo abandona, marcando así la temperatura máxima. Para dejar el termómetro apto para una nueva observación, es necesario poner los índices

en contacto con el mercurio por medio de un imán.

### Dilatación de los cuerpos sólidos.

Sabemos ya que los cuerpos se dilatan por el calor. Es claro que se dilatan siempre en sus tres dimensiones.

Sin embargo, si se trata de una barra o de un alambre, la dilatación será apreciable en una sola de sus dimensiones, el largo.

Siempre que nos interesa la dilatación de un cuerpo en un solo sentido, hablamos de **dilatación lineal**; si nos interesa su cambio de volumen, de **dilatación cúbica**.

#### Dilatación lineal.

Para medir la dilatación lineal disponemos, entre otros, del siguiente aparato de Fues (fig. 60).

La barra *a* cuya dilatación estudiamos está sostenida en su extremo inferior por el tornillo micrométrico *g* y en contacto su otro extremo con la pieza *c* que forma parte del brazo *i* que gira en torno del eje *h*. Entre el filo de la pieza *c* y el de otra análoga invertida *l* (fija) se encuentra la aguja *E* provista de un peso *P* que tiende a subirla; su extremo recorre un arco graduado *H* que tiene el 0 al medio.

La barra *a* se coloca dentro de un tubo ancho *D* que tiene arriba un tubo *M* de comunicación con el exterior y otros dos *N* abajo.

Después de colocada la barra *a* en la posición indicada, se mueve el tornillo *g* hasta que la aguja *E* quede en el punto 0 del arco y se anota el valor que marca el tornillo micrométrico.

Se hace entrar en seguida un chorro de vapores de agua hirviendo por los tubos *N*, los que saldrán por el otro *M*.

La barra *a* se dilata y por medio de la pieza *c* mueve la aguja *E*, haciendo bajar su punta. Cuando la dilatación ha cesado, se mueve el tornillo micrométrico *g* hasta que la aguja vuelva al punto 0; anotamos el

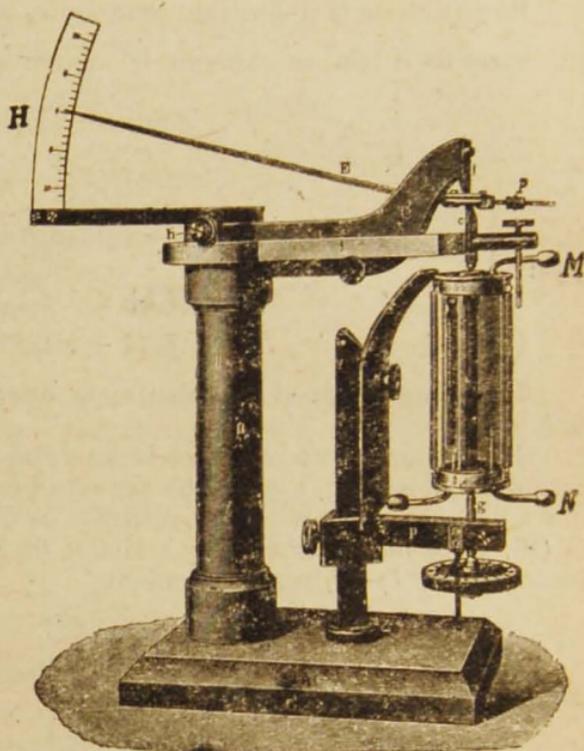


Fig. 60

nuevo valor que indica el tornillo y la resta entre este valor y el anterior nos da la dilatación experimentada por la barra *a*. Sean los valores indicados por el tornillo 50 y 68, entonces la dilatación será de  $\frac{18}{200}$  [mm], puesto que una división del tornillo corresponde a  $\frac{1}{200}$  [mm].

Cambiamos después la barra *a* por otra igual de otra substancia (vidrio, latón, plomo, etc.) y repitamos la experiencia anterior; obtendremos valores completamente distintos, lo que nos dice que cada substancia sufre, en igualdad de condiciones, una dilatación que le es característica.

Para aprovechar prácticamente los resultados que se obtengan y comparar dichas dilataciones, referimos éstas a las unidades conocidas y hablamos entonces del **coeficiente de dilatación** de las substancias.

El coeficiente de dilatación lineal indica el aumento de longitud que experimenta una barra de 1 [cm] de largo cuando su temperatura sube 1°.

Supongamos ahora que el largo  $l_0$  de la barra  $a$  se ha medido a  $0^\circ$  y que después la calentamos hasta  $t^\circ$ . ¿Cuál será su largo  $l_t$  a  $t^\circ$ ? El coeficiente de dilatación sea  $\lambda$ .

Partiendo de la definición, tendremos: si

una barra de 1 [cm]	se calienta $1^\circ$	aumenta su largo en	$\lambda$ [cm].
» » » 1 » » »	$4^\circ$	» » » »	$4 \lambda$ »
» » » 1 » » »	$t^\circ$	» » » »	$t \lambda$ »
» » » 5 » » »	$t^\circ$	» » » »	$5 t \lambda$ »
» » » $l_0$ » » »	$t^\circ$	» » » »	$l_0 t \lambda$ »

Como el largo era de  $l_0$  [cm] y aumentó en  $l_0 t \lambda$  [cm] su largo final  $l_t$  es:

$$(18) \quad \begin{aligned} l_t &= l_0 + l_0 \lambda t \\ l_t &= l_0 (1 + \lambda t). \end{aligned}$$

Para determinar el coeficiente de dilatación  $\lambda$ , basta conocer  $l_t$ ,  $l_0$  y  $t$ .

En la práctica no medimos la longitud a  $0^\circ$ , sino a la temperatura del ambiente,  $t$ , y conviene por esto buscar una relación entre dos longitudes a temperaturas distintas de  $0^\circ$ ; apliquemos la fórmula (18) a dos temperaturas  $T$  y  $t$ , siendo los largos de la barra a estas temperaturas  $l_T$  y  $l_t$ , respectivamente:

$$\begin{aligned} l_T &= l_0 (1 + \lambda T) \\ l_t &= l_0 (1 + \lambda t) \end{aligned}$$

dividámoslas

$$\frac{l_T}{l_t} = \frac{l_0 (1 + \lambda T)}{l_0 (1 + \lambda t)}$$

$$l_T = l_t \frac{(1 + \lambda T)}{(1 + \lambda t)}$$

Haciendo la división de los binomios, resulta:

$$(1 + \lambda T) : (1 + \lambda t) = 1 + \lambda T - \lambda t + \lambda^2 T t - \lambda^2 t^2 + \lambda^3 T t - \dots$$

Como  $\lambda$  es una fracción de un valor muy pequeño, los valores  $\lambda^2$ ,  $\lambda^3$ , etc. no influyen en los cálculos y pueden suprimirse. Aceptaremos, pues, el resultado:

$$(19) \quad l_T = l_t [1 + \lambda (T - t)].$$

Despejemos de esta ecuación el valor de  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{l_T - l_t}{l_t (T - t)}$$

El numerador representa el aumento de longitud de la barra desde la temperatura del ambiente  $t$  hasta la ebullición del agua  $T$  y es el valor que medimos por medio del tornillo micrométrico;  $l_t$  es el largo de la barra a  $t^\circ$  y lo determinamos por un vernier, las temperaturas las medimos por un termómetro.

**Ejemplo:** La barra de hierro mide 99,3 [mm] a 22,5°, el tornillo marca 70; la temperatura de agua hirviendo es de 98,2°; el tornillo marca la segunda vez 88. ¿Cuál es el coeficiente de dilatación del hierro?

$$l_T - l_t = \frac{88 - 70}{200} = 0,09 \text{ [mm]}$$

$$\lambda = \frac{0,09}{99,3 (98,2 - 22,5)} = 0,000012.$$

Se han obtenido los coeficientes que siguen:

aluminio	0,000023	hierro	0,000012
cobre	0,000017	latón	0,000019
madera	0,000003 a 9	porcelana	0,000010
platino	0,000009	vidrio	0,000008
plomo	0,000029	zinc	0,000029

La dilatación de los cuerpos debe tomarse muy en cuenta en las construcciones de puentes, por ejemplo. Para comprenderlo mejor resolvamos un problema:

**Problema:** ¿Cuánto se dilata un puente cuya longitud a 0° es de 300 [m], si se calienta en verano hasta 50°?

$$l_t = l_0 (1 + \lambda t)$$

$$l_{50} = 30000 (1 + 0,000012 \cdot 50)$$

$$l_{50} = 30018 \text{ [cm].}$$

El puente se dilata 18 [cm].

Ahora bien, si se construye un puente hay que dejar espacio para la dilatación y si se comete la falta de empotrar los extremos del puente en las murallas, éstas serían destruidas, pues tanto la dilatación como la contracción, tienen lugar con una fuerza muy grande.

### Fuerza de la dilatación.

**77. Experimento:** Calentemos bastante una barra gruesa de hierro (fig. 61) y coloquémosla en su soporte muy resistente; sujetémosla por un extremo colocando una barra de hierro de 1 [cm] de diámetro más o menos en el agujero que allí hay y apretemos la tuerca del otro extremo; dejémosla enfriar y observemos el efecto que produce sobre la barra.

La barra atravesada en el agujero se rompe debido a la enorme fuerza con que se verifica la contracción al bajar la temperatura.

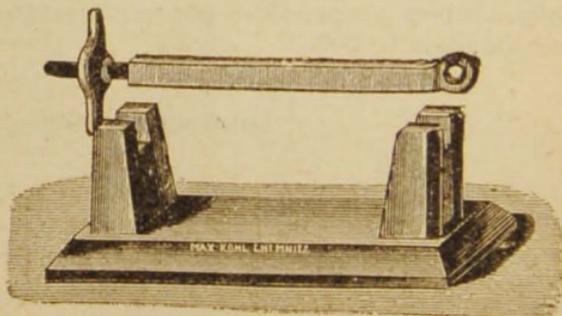


Fig 61

Hay que tener cuidado de no colocar muy tirantes en verano los alambres telegráficos porque en el invierno pueden cortarse.

### Péndulo compensador.

Sabemos que los relojes regularizan su marcha por medio de un péndulo y para poder indicar exactamente los segundos, el péndulo debe tener una longitud determinada. Si el péndulo es más largo el reloj atrasa y adelanta si es más corto. Ahora bien, si el péndulo está formado de una sola barra, tiene que alargarse en el verano y acortarse en el invierno y por este motivo tales relojes atrasan en verano y adelantan en invierno, no pudiendo conservar la uniformidad que es indispensable para la medida del tiempo. Para evitar este inconveniente se construye el péndulo compensador, basado en la desigualdad de los coeficientes de dilatación de los metales. Se prefieren dos metales cuyos coeficientes de dilatación sean muy diferentes, acero y zinc, por ejemplo. El péndulo está suspendido por el travesaño *A* (fig. 62), del cual pender dos varillas de acero de igual longitud  $a_1$ . Ligadas a éstas por los travesaños *B*, se encuentran dos varillas de zinc,  $z_2$ , y por fin, pendiente del tercer travesaño *C*, otra varilla de acero,  $a_3$ , que lleva la lenteja. De la disposición anterior se deduce que las tres varillas de acero sólo pueden dilatarse hacia abajo y las de zinc sólo hacia arriba. Lo esencial ahora es que la longitud total  $l_0$  quede constante, lo que se consigue atendiendo a que las varillas de zinc son más cortas, pero tienen mayor coeficiente de dilatación.

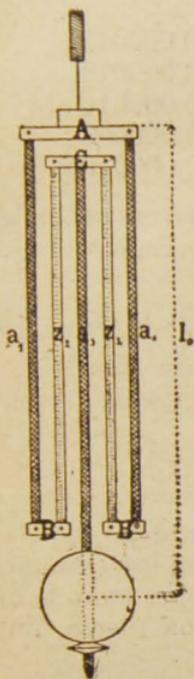


Fig. 62

Muchas veces los péndulos se construyen con mayor número de varillas, pero ordenadas según este mismo principio. En los relojes de bajo precio los péndulos compensadores se reemplazan por péndulos simples, suspendidos por varillas de bajo coeficiente de dilatación (madera 0,000003).

### Dilatación cúbica.

En lo que precede hemos considerado únicamente la dilatación en una sola dimensión; pero cuando se trata de cuerpos en los cuales no podemos despreciar las otras dimensiones con respecto al largo, hay que hablar de **dilatación cúbica**.

**78. Experimento:** Calentemos un cubo de metal y midamos sus aristas antes y después de calentarlo.

Se dilata en todos sentidos, de modo que todas sus aristas se hacen mayores, pero el cuerpo dilatado seguirá siendo de forma cúbica.

Para relacionar ambos volúmenes del cubo, necesitamos definir el **coeficiente de dilatación cúbica**.

**LLámase coeficiente de dilatación cúbica el aumento de volumen que experimenta un centímetro cúbico cuando la temperatura sube 1°.**

Si suponemos que la arista sea de 1 [cm] a 0°, a 1° será de  $1 + \lambda$  designando como antes por  $\lambda$  el coeficiente de dilatación lineal.

El cubo tendrá el volumen:

$$(1 + \lambda)^3 = 1 + 3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3.$$

El aumento de volumen del  $\text{cm}^3$  es, pues, de

$$3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3,$$

que representa el verdadero coeficiente de dilatación cúbica.

Pero  $\lambda$  es un valor muy pequeño (0,000012 para el fierro) y  $\lambda^2$  y  $\lambda^3$  más pequeños aún (0,000000000144 y 0,00000000000001728 en el ejemplo anterior) y sus valores pueden desestimarse sin cometer error apreciable.

Podemos aceptar, por consiguiente, el valor  $3\lambda$  como coeficiente de dilatación cúbica y decir que el **coeficiente de dilatación cúbica de un cuerpo sólido es igual al triple de su coeficiente de dilatación lineal**.

Si elevamos la temperatura de 1 [cm<sup>3</sup>] en 2° resulta  $1 + 3\lambda \cdot 2$  y si en  $t^\circ$ ,  $1 + 3\lambda \cdot t$  y si tomamos en vez de 1 [cm<sup>3</sup>],  $v_o$  [cm<sup>3</sup>], resulta  $v_o (1 + 3\lambda t)$ . Designando este volumen por  $v_t$  obtenemos:

$$(20) \quad v_t = v_o (1 + 3\lambda t).$$

Como en general, medimos el volumen de un cuerpo a la temperatura ordinaria, conviene buscar una relación de volúmenes a esta temperatura y a cualquiera otra. Para esto tenemos las ecuaciones:

$$v_T = v_o (1 + 3\lambda T)$$

$$v_t = v_o (1 + 3\lambda t)$$

$$\frac{v_T}{v_t} = \frac{1 + 3\lambda T}{1 + 3\lambda t}.$$

Efectuando la división y despreciando los términos que tienen los factores  $\lambda^2$  y  $\lambda^3$ ... resulta:

$$(21) \quad v_T = v_t [1 + 3\lambda (T - t)].$$

**Problema:** ¿Qué volumen tendrá a 200° un trozo de plomo que mide 25 [dm<sup>3</sup>] a 0°? ¿Cuánto aumenta dicho volumen?

$$v_t = 25000 (1 + 3 \cdot 0,000029 \cdot 200)$$

$$v_{200} = 25000 \cdot 1,0174 = 25435 \text{ [cm}^3\text{]}.$$

El volumen aumentó en 435 [cm<sup>3</sup>].

**Problema:** Un trozo de cobre mide  $\frac{1}{2}$  [m<sup>3</sup>] a 50°. ¿Qué volumen ocupa a 550°?

$$v_{550} = v_{50} [1 + 3 \cdot 0,000017 \cdot (550 - 50)]$$

$$v_{550} = 500000 (1 + 0,0255) = 512750 \text{ [cm}^3\text{]}.$$

El volumen ha aumentado en 12750 [cm<sup>3</sup>].

## Dilatación de los cuerpos líquidos.

En los cuerpos líquidos podemos hablar únicamente de dilatación cúbica, porque, aunque el líquido esté encerrado en tubos, su aumento de longitud no sólo proviene de la dilatación en dirección longitudinal, sino que el líquido se dilata también en dirección transversal y por la gran movilidad, sus partículas son desalojadas longitudinalmente, aumentando así el largo de la columna líquida.

El experimento 74 nos ha demostrado que la dilatación de un líquido va íntimamente ligada a la dilatación del recipiente que lo contiene.

Si pudiéramos independizar por completo el líquido, de su recipiente, veríamos la verdadera dilatación del líquido, o sea, su **dilatación absoluta**.

Si observamos la dilatación del líquido contenido en un vaso, veremos una dilatación menor que se llama **dilatación aparente**.

Es evidente, además, que la dilatación absoluta es igual a la dilatación aparente más la del recipiente.

### Anomalía de la dilatación del agua.

**79. Experimento:** Pongamos el matraz del experimento N.º 74 (fig. 54) en hielo fundente y marquemos después de algún tiempo el nivel del agua en el tubo. En seguida pongamos el matraz sucesivamente en baños de 20°, 40°, 60° y 80°, marcando cada vez el nivel y midamos la variación del nivel al subir la temperatura de 0° a 20°, de 20° a 40°, de 40° a 60° y a 80°.

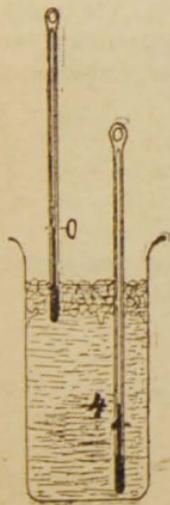


Fig. 63

Estas variaciones serán distintas, lo que nos dice que el agua se dilata muy irregularmente. Por experimentos parecidos a los anteriores se comprueba que si se calienta el agua de 0° a 4° no se dilata sino que se contrae y que sólo subiendo de esta temperatura se dilata. El agua ocupa a 4° el menor volumen y por eso tiene a esta temperatura su densidad máxima.

**80. Experimento:** A un vaso con agua echémosle pedazos de hielo y coloquemos dos termómetros, uno sumergido hasta el fondo y el otro con su matraz cerca de la superficie (fig. 63) y observemos atentamente las temperaturas que indiquen los dos.

Al comenzar la experiencia, ambos termómetros marcan igual temperatura; después ambos comienzan a descender hasta que indican 4° y desde este momento el termómetro superior baja hasta 0° y el inferior queda fijo en 4°.

¿Qué ha sucedido? El agua en contacto con el hielo se enfría hasta 4° y como a esta temperatura tiene su máximo de densidad,

esta agua se va al fondo y es reemplazada por otra que también se enfría hasta 4° y baja, repitiéndose esto hasta que toda el agua haya adquirido la temperatura de 4°. Entonces el agua de la superficie puede enfriarse más, pero no baja porque a temperaturas más bajas que 4° la densidad es menor y por este motivo queda en la superficie. Así se acumula en el fondo agua a 4° y encima otras capas más frías y, como el agua conduce muy mal el calor se conserva en el fondo la temperatura de 4°.

Esta experiencia explica el hecho de que el agua en el fondo de los lagos profundos conserve durante todo el año la temperatura de 4°.

Por la gran desproporción entre las temperaturas y los volúmenes respectivos, no sirve el agua para fabricar termómetros ni se puede aplicar una fórmula para calcular los volúmenes que ocupa una cantidad de agua a distintas temperaturas, sino que hay que determinar experimentalmente esta relación.

Se ha encontrado que 1 [gr] de agua ocupa:

	a 0° el volumen	1,00012 [cm <sup>3</sup> ]	y su densidad es	0,999874	$\left[ \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$
+ 4° »	»	1,00000	»	»	1,000000
+ 8° »	»	1,000114	»	»	0,999878
+ 20° »	»	1,00176	»	»	0,99824
+ 40° »	»	1,00770	»	»	0,99235
+ 60° »	»	1,0170	»	»	0,98338
+ 80° »	»	1,0289	»	»	0,97296
+ 100° »	»	1,0432	»	»	0,96587

## Dilatación de los cuerpos gaseosos.

**81. Experimento:** Encerremos en la rama corta y graduada en cm<sup>3</sup> de un tubo en forma de U (fig. 64) una masa de gas, echando mercurio en el tubo, de modo que los niveles *C* y *C*<sub>1</sub> sean iguales en las dos ramas y anotemos el volumen *v*<sub>t</sub> que ocupa el gas y su temperatura *t*. Hagamos pasar ahora por el tubo ancho que encierra a la rama corta, vapores de agua hirviendo.

El mercurio baja de *C* a *C'* y sube de *C*<sub>1</sub> a *C*'<sub>1</sub> a causa de la dilatación del gas.

Además de la dilatación que experimenta el gas, aumenta también su tensión, puesto que antes, por ser iguales los niveles *C* y *C*<sub>1</sub> su tensión era igual a la presión atmosférica *b*; ahora ha aumentado en la presión de la columna *h* de mercurio.

Vemos que el calor produce en los gases al mismo tiempo un aumento de volumen y otro de tensión.

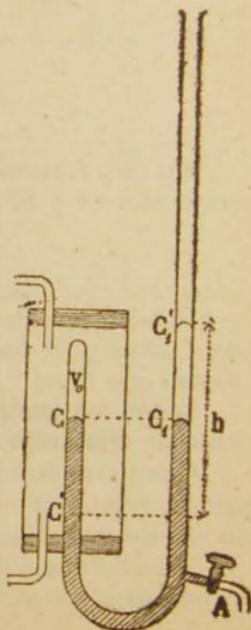


Fig. 64

Para poder estudiar separadamente estos dos efectos, tenemos que dejar constante una vez la presión, para que no varíe más que el volumen y después dejar constante el volumen y variar la presión.

**82. Experimento:** Hagamos salir mercurio del tubo (fig. 64), abriendo la llave *A*, hasta que se igualen los niveles; anotemos el volumen  $v_T$  que ocupa el gas y la temperatura  $T$  de los vapores de agua hirviente.

Los datos deducidos de los experimentos 81 y 82 nos sirven para encontrar el **coeficiente de dilatación cúbica del gas, que es el aumento de volumen que experimenta 1 [cm<sup>3</sup>] de gas si su temperatura sube 1° sin que varíe la presión a la cual está sometido.**

Designándolo por  $\alpha_v$  resulta:

1 [cm<sup>3</sup>] se dilata, elevando la temperatura de 0° a 1°,  $\alpha_v$   
 $v_0$  > > > > > > > 0° a 1°,  $\alpha_v v_0$   
 $v_0$  > > > > > > > 0° a  $t^\circ$ ,  $\alpha_v v_0 t$

Sea  $v_t$  el volumen a  $t^\circ$ , tenemos:

$$\begin{aligned} v_t &= v_0 + v_0 \alpha_v t \\ (22) \quad v_t &= v_0 (1 + \alpha_v t). \end{aligned}$$

Para otra temperatura  $T$  resultaría el volumen

$$v_T = v_0 (1 + \alpha_v T)$$

y dividiendo las dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{v_t}{v_T} &= \frac{1 + \alpha_v t}{1 + \alpha_v T} \\ v_t (1 + \alpha_v T) &= v_T (1 + \alpha_v t) \\ \alpha_v \cdot v_t \cdot T - \alpha_v \cdot v_T \cdot t &= v_T - v_t \\ \alpha_v &= \frac{v_T - v_t}{v_t T - v_T t}. \end{aligned}$$

En esta fórmula substituímos los valores encontrados en los experimentos 81 y 82 y obtenemos:

$$\alpha_v = 0,00367 = \frac{1}{273}.$$

Determinando el valor de  $\alpha_v$  para los demás gases, encontró **Gay-Lussac** para todos el mismo valor, y formuló la **ley de Gay-Lussac**, que dice:

**Todos los gases, bajo presión constante, tienen el mismo coeficiente de dilatación =  $\frac{1}{273} = 0,00367$ .**

Comparando este coeficiente con los de los cuerpos sólidos y líquidos, vemos que es mucho mayor, de modo que los gases se dilatan mucho más que los otros cuerpos.

Ahora vamos a ver cómo varía la tensión del gas elevando su temperatura y manteniendo constante su volumen.

**83. Experimento:** Repitamos el experimento N.º 81 y anotemos la presión atmosférica  $b$  y la temperatura  $t$ ; cuando pasa el vapor de agua por el tubo más ancho, echemos más mercurio en la rama larga hasta que el nivel en la corta llegue al punto  $C$ ; anotemos la temperatura  $T$  de los vapores y la altura  $h$  de la columna de mercurio desde  $C$  hasta el nivel en la rama larga.

A la temperatura  $t$  la tensión del gas encerrado ha sido igual a la presión atmosférica  $p_t = b$  y por la elevación de la temperatura hasta  $T$  ha aumentado hasta  $p_T = b + h$ .

Estos valores nos permiten determinar el **coeficiente de tensión que es el aumento que experimenta la unidad de tensión, 1  $\left[ \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right]$ , cuando la temperatura del gas sube  $1^\circ$ , sin que varíe el volumen.**

Designándolo por  $\alpha_p$ , tenemos:

$$1 \left[ \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right] \text{ aumenta, elevando la temperatura de } 0^\circ \text{ a } 1^\circ, \alpha_p$$

$$p_o \quad \gg \quad \gg \quad \gg \quad \gg \quad \gg \quad 0^\circ \text{ a } 1^\circ, \alpha_p p_o$$

$$p_o \quad \gg \quad \gg \quad \gg \quad \gg \quad \gg \quad 0^\circ \text{ a } t^\circ, \alpha_p p_o t$$

La tensión del gas a la temperatura  $t^\circ$  es:

$$p_t = p_o + p_o \alpha_p t$$

$$(23) \quad p_t = p_o (1 + \alpha_p t).$$

Para la temperatura  $T$  resulta la tensión:

$$p_T = p_o (1 + \alpha_p T)$$

y dividiendo y despejando  $\alpha_p$ , obtenemos:

$$\alpha_p = \frac{p_T - p_t}{p_t T - p_T t}.$$

En esta ecuación sustituimos los valores arriba encontrados y obtenemos:

$$\alpha_p = \frac{1}{273} = 0,00367.$$

Gay-Lussac encontró que **todos los gases, bajo volumen constante, tienen el mismo coeficiente de tensión, igual al coeficiente de dilatación cúbica.**

### La escala absoluta de temperaturas.

Ahora vamos a volver a la ecuación  $p_t = p_o (1 + \alpha_p t)$ . Si la temperatura baja hasta  $-1^\circ$ , la presión disminuye y resulta:

$$p_{-1} = p_o \left( 1 - \frac{1}{273} \right).$$

Enfriando hasta  $-2^{\circ}$  se obtiene:

$$p_{-2} = p_0 \left( 1 - \frac{2}{273} \right)$$

y al fin hasta  $-273^{\circ}$ , resulta:

$$p_{-273} = p_0 \left( 1 - \frac{273}{273} \right) = 0.$$

Como se ve, a la temperatura de  $-273^{\circ}$  la tensión del gas se anula; si pudiéramos bajar más aún la temperatura, la tensión tomaría valores negativos, lo que es absurdo. Se deduce de esto que la temperatura más baja que pueda existir es la de  $-273^{\circ}$  centígrados y se la llama el **cero absoluto** de las temperaturas y la escala que parte desde ese punto se llama **escala absoluta** de temperaturas.

Para obtener la temperatura absoluta basta sumarle  $273^{\circ}$  a la temperatura de la escala centígrada:

$$(24) \quad T = 273 + t.$$

Si la temperatura en la escala Celsius es de  $15^{\circ}$ , la temperatura absoluta será de  $273 + 15 = 288^{\circ}$ .

Esta **escala absoluta** es de gran importancia científica.

La disminución de la tensión del gas hasta 0 se explica fácilmente por la teoría cinética de los gases, según la cual, las partículas del gas están en movimiento rectilíneo y la tensión resulta por los choques de estas partículas contra las paredes donde se reflejan. Con el descenso de la temperatura disminuye la velocidad de las partículas, de modo que los choques son menos frecuentes y a la temperatura de  $-273^{\circ}$  las partículas se suponen sin velocidad (en reposo) de modo que cesan los choques y sin ellos la tensión es nula.

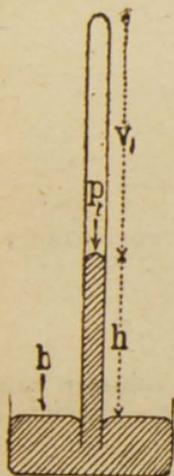


Fig. 65.

### Ley combinada de Mariotte y Gay-Lussac.

Sabemos que el volumen que ocupa una masa de gas depende de la presión y de la temperatura a que está sometida. Ahora bien, si queremos comparar dos volúmenes de gas, tenemos que tomarlos a la misma presión y temperatura y como tales se eligen la presión normal de 76 [cm] de mercurio y la temperatura  $0^{\circ}$ , y el volumen que ocupa el gas bajo estas condiciones se llama **volumen normal**.

Como recogemos en general los gases sobre mercurio (fig. 65) o agua a la temperatura ambiente  $t$  y a la presión  $p_t = b - h$ , tenemos que calcular el volumen que ocuparía la misma cantidad de

gas a 0° y a la presión de 76 [cm], o, como se dice, tenemos que **reducir el gas a su estado normal.**

Primero calcularemos el volumen que ocuparía el gas a la presión normal  $p_0$ , dejando constante la temperatura  $t$ .

Sea este volumen  $v'_t$ ; según la ley de Mariotte es:

$$v_t p_t = v'_t p_0$$

$$v'_t = \frac{v_t p_t}{p_0}$$

Ahora reduzcamos el volumen del gas a 0° dejando constante la presión normal. La ley de Gay-Lussac nos da:

$$v'_t = v_0 (1 + \alpha_v t)$$

$$v_0 = \frac{v'_t}{1 + \alpha_v t}$$

$$(25) \quad v_0 = \frac{v_t p_t}{p_0 (1 + \alpha_v t)}$$

**Ejemplo:** El volumen recogido sea de 50 [cm<sup>3</sup>] a la temperatura de 20°, la altura  $h = 30$  [cm] y la presión atmosférica de 72 [cm]. ¿Cuál es el volumen normal?

$$v_0 = \frac{50 (72 - 30)}{76 (1 + 0,00367 \cdot 20)} = \frac{50 \cdot 42}{76 \cdot 1,0735} = 25,74 \text{ [cm}^3\text{]}$$

### Densidad de los gases a cualquiera temperatura y presión.

Al dilatarse un gas su masa no varía, pero sí varía su densidad. Designando la masa del gas por  $m$  y su densidad y volumen a 0° y a la presión normal  $p_0$ , por  $d_0$  y  $v_0$  y las mismas cantidades a  $t^\circ$  y a la presión  $p_t$  por  $d_t$  y  $v_t$ , resulta:

$$m = v_0 d_0$$

$$m = v_t d_t$$

$$\frac{v_t d_t}{v_t d_t} = \frac{v_0 d_0}{v_t d_t}$$

Además hemos visto en el capítulo anterior que

$$v_0 = \frac{v_t p_t}{p_0 (1 + \alpha_v t)}$$

y substituyendo este valor en la ecuación anterior, obtenemos:

$$v_t d_t = \frac{v_t p_t}{p_0 (1 + \alpha_v t)} \cdot d_0$$

$$(26) \quad d_t = \frac{d_0 p_t}{p_0 (1 + \alpha_v t)}$$

Esta fórmula nos permite determinar la densidad de un gas a una temperatura y presión conocidas partiendo de la densidad normal que encontramos en tablas especiales.

**Problema:** La densidad normal del aire es  $d_o = 0,001293$ . ¿Cuál es su densidad a 72 [cm] de presión y a 25° de temperatura?

$$d_t = \frac{0,001293 \cdot 72}{76 (1 + 0,00367 \cdot 25)} = \frac{0,093096}{82,973} = 0,001122.$$

### Ecuación de estado de los gases perfectos.

La ecuación (25) puede escribirse también así:

$$\begin{aligned} v_t p_t &= v_o p_o (1 + \alpha_v \cdot t) \\ &= v_o p_o \alpha_v \left( \frac{1}{\alpha_v} + t \right) \\ &= v_o p_o \alpha_v (273 + t) \\ &= v_o p_o \alpha_v \cdot T. \end{aligned}$$

Esta ecuación rige para cualquiera masa de gas; supongamos ahora que esta masa sea de 1 [gr]; su volumen normal es  $v_o = \frac{1}{d_o}$ , siendo  $d_o$  la densidad normal; la ecuación anterior se transforma en

$$v_t p_t = \frac{p_o \cdot \alpha_v}{d_o} \cdot T.$$

Para un gas determinado el valor de  $\frac{p_o \cdot \alpha_v}{d_o}$  es un valor determinado que se designa por  $R_g$ ; resulta:

$$(27) \quad v_t p_t = R_g \cdot T.$$

Esta ecuación se llama la **ecuación de estado de los gases perfectos de Thomson**.

El valor de  $R_g$  es fácil de calcular. Para el hidrógeno es en unidades absolutas:

$$R_H = \frac{76 \cdot 13,6 \cdot 980,6}{273 \cdot 0,0000897} = 41\,508\,000 \left[ \frac{\text{erg}}{\text{grado}} \right].$$

Los valores de  $R$  para un gas cualquiera ( $R_g$ ) y para el hidrógeno ( $R_H$ ) son:

$$R_g = \frac{p_o \alpha_v}{d_{gn}}$$

$$R_H = \frac{p_o \alpha_v}{d_{Hn}}$$

designando por  $d_{gn}$  y  $d_{Hn}$  las densidades normales del gas y del hidrógeno. Formando la razón entre ellos obtenemos:

$$\frac{R_g}{R_H} = \frac{d_{Hn}}{d_{gn}}$$

Según la ley de Avogadro, volúmenes iguales de los distintos gases, en igualdad de presión y temperatura, contienen el mismo número  $n$  de moléculas; si designamos por  $\mu_g$  y  $\mu_H$  las masas de las moléculas respectivas, resulta:

$$n \cdot \mu_H = v \cdot d_{Hn}$$

$$n \cdot \mu_g = v \cdot d_{gn}$$

$$\frac{\mu_H}{\mu_g} = \frac{d_{Hn}}{d_{gn}}$$

Pero

$$\frac{R_g}{R_H} = \frac{d_{Hn}}{d_{gn}}$$

y

$$\frac{R_g}{R_H} = \frac{\mu_H}{\mu_g}$$

$$R_g = R_H \cdot \frac{\mu_H}{\mu_g}$$

Substituyendo este valor en la ecuación (27), resulta:

$$v_t \cdot p_t = \frac{R_H \cdot \mu_H}{\mu_g}$$

Esta ecuación determina el volumen que ocupa 1 [gr] de gas a la temperatura de  $t^\circ$  ( $T = 273 + t$ ) y a la presión  $p_t$ . Si en vez de 1 [gr] tomamos  $\mu_g$  [gr] de gas, o sea un número de gramos igual al peso molecular del gas, lo que se llama **una molécula-gramo**, su volumen será  $\mu_g$  veces mayor que el anterior; vamos a designar este nuevo volumen por  $v_{\mu t}$ ; resulta:

$$v_{\mu t} = \mu_g \cdot \frac{R_H \cdot \mu_H}{\mu_g \cdot p_t} \cdot T = \frac{R_H \cdot \mu_H}{p_t} \cdot T$$

El valor del producto  $R_H \cdot \mu_H$  es constante para todos los gases y se llama **constante absoluta de los gases** y su valor es  $8,32 \cdot 10^7$   $\left[ \frac{\text{erg}}{\text{grado}} \right]$ .

Si designamos por  $R$  a este valor ( $R = R_H \cdot \mu_H$ ) resulta la **ecuación de Clapeyron**:

$$(28) \quad v_{\mu t} = \frac{R}{p_t} \cdot T$$

**La molécula-gramo de cualquier gas, a igual presión y temperatura, ocupa igual volumen.**

¿Qué volumen ocupa la molécula-gramo de cualquier gas en estado normal?

$$v_{\mu_0} = \frac{8,32 \cdot 10^7 \cdot 273}{76 \cdot 13,6 \cdot 980,6} = 22\,410 \text{ [cm}^3\text{]}.$$

$$v_{\mu_0} = 22,41 \text{ litros.}$$

**La molécula-gramo de cualquier gas ocupa en su estado normal un volumen de 22,41 litros.**

**Problema:** ¿Qué volumen ocupan 6 [gr] de  $H$  en estado normal?

Como la molécula-gramo de  $H$  es 2, los 6 [gr] ocupan 3 veces el volumen de 22,41 [l] = 67,23 [l].

### Preguntas.

1. ¿Cómo se encorva una doble cinta de latón y fierro, calentándola?
2. ¿Cómo podría aprovecharse la dilatación para colocar una llanta de fierro a una rueda de madera para que ajuste perfectamente?
3. ¿Por qué salta el esmalte de las ollas de fierro que se colocan sin agua al fuego?
4. ¿Qué procedimiento fundado en la dilatación, puede emplearse para destapar un frasco cuyo tapón de vidrio se ha apretado excesivamente?
5. ¿Cómo se explica que en el verano las puertas y ventanas de madera no ajusten bien, mientras que en el invierno se cargan? ¿Por qué no sucede lo mismo con puertas de fierro?
6. ¿Por qué se suelda fácilmente el platino al vidrio, mientras que el vidrio se quiebra al enfriarse cuando se ha soldado con otro metal a una temperatura elevada?
7. ¿Por qué se calientan los moldes de zinc en que se congela el agua en la fabricación del hielo, antes de sacar el hielo?

### Problemas.

- 1) Una barra de fierro tiene a  $15^\circ$  Celsius una longitud de 45 [cm]. ¿Qué largo posee a  $100^\circ$  Fahrenheit?
- 2) Con una regla de latón se mide a  $16^\circ$  Celsius una barra y se la encuentra igual a 1860,4 [m]. Si la regla sólo es exacta a  $0^\circ$  ¿cuál ha sido la longitud verdadera de la barra?
- 3) Un disco de plomo de 15 [cm] de radio a  $20^\circ$  Celsius se calienta hasta  $60^\circ$  F. ¿Cuál es el radio  $r_2$  y su superficie  $S$ ?
- 4) ¿Qué volumen posee un matraz de vidrio a  $60^\circ$ , si a  $4^\circ$  contiene 1 [kg] de agua?
- 5) Se construye una línea férrea de 3 [km] con rieles de 10 [m] de largo a  $0^\circ$ . ¿Cuántos rieles se necesitan y qué espacio hay que dejar entre los rieles, si la temperatura varía entre  $5^\circ$  y  $60^\circ$ ?
- 6) Una estera de latón posee a  $16^\circ$  un radio de 20 [mm]. ¿Hasta qué temperatura hay que calentarla, para que pueda pasar justamente por un anillo cuyo radio es de 20,1 [mm]?
- 7) Un trozo de mármol tiene a  $5^\circ$  un volumen 3,9 [m<sup>3</sup>]. ¿Cuál es su volumen a  $35^\circ$  y cuál es su densidad, siendo el coeficiente de dilatación lineal  $\lambda = 0,0000085$  y su densidad a  $0^\circ$  igual a 2,83  $\left[ \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$ ?

8) Un péndulo construído con una varilla de latón efectúa una oscilación por segundo a  $15^\circ$ . ¿Cuántas oscilaciones menos efectuará a  $30^\circ$  en un día?

9) Dos murallas que se encontraban a la distancia 10 [m] se han inclinado hacia afuera en 0,06 [m]. Para hacerlas volver a su posición inicial se aprovecha una barra de fierro caliente en cuyos extremos se encuentran hacia los lados exteriores de la muralla planchas de fierro. ¿En cuántos grados hay que calentar la barra para que las murallas vuelvan a su posición inicial?

10) ¿Qué volumen ocupa una cantidad de mercurio a  $80^\circ$  si a  $20^\circ$  ocupa 8 [cm<sup>3</sup>] y cual es su densidad a  $80^\circ$  si a  $0^\circ$  es  $13,6 \left[ \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$ ?

11) Un matraz de vidrio tiene un volumen de 1 litro a  $0^\circ$  y está lleno de mercurio. ¿Cuántos gr de mercurio salen si se eleva la temperatura del matraz a  $100^\circ$  siendo el coeficiente de dilatación lineal del vidrio  $\lambda = 0,000008$ ?

12) ¿Cuál es la presión atmosférica en  $\left[ \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} \right]$ , si el barómetro tiene a  $25^\circ$  una columna de mercurio de 75 [cm]?

13) ¿Cuál es la presión atmosférica en  $\left[ \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} \right]$  si el barómetro marca a  $30^\circ$  una columna de mercurio de 74 [cm] que se mide con una regla de latón que sólo es exacta a  $15^\circ$ ?

14) Una masa de aire ocupa a  $24^\circ$  un espacio de 1000 [cm<sup>3</sup>]. ¿Cuál es el volumen que ocuparía a  $0^\circ$  y a la misma presión?

15) ¿Cuántos gramos pesan  $v = 2500$  [cm<sup>3</sup>] de aire a  $18^\circ$  y a la presión atmosférica de 72 [cm]?

16) A qué temperatura ocupa una masa de aire un espacio de 140 [cm<sup>3</sup>] suponiendo una presión atmosférica de 74 [cm] si ocupaba a  $8^\circ$  y a la presión de 75 [cm] un volumen de 110 [cm<sup>3</sup>].

17) ¿Cuál es el volumen normal de un gas, que a la temperatura de  $10^\circ$  y a la presión atmosférica de 76 [cm] ha sido recogido sobre una columna de mercurio de 20 [cm]?

18) Se han recogido 80 [cm<sup>3</sup>] de un gas sobre una columna de agua de 16 [cm] a  $20^\circ$  y a la presión atmosférica de 74 [cm]. ¿Cuál es su volumen normal?

19) Cuántos gr de aire entran o salen de un matraz de 12 litros si la temperatura de la pieza sube de  $10^\circ$  a  $20^\circ$  y la presión atmosférica aumenta de 72 a 73 [cm]?

### Ejercicios prácticos.

1. Construir un termómetro.
2. Verificar los puntos fijos de termómetros usados en clase.
3. Observar durante 8 días a una hora determinada del día las temperaturas máximas y mínimas de la atmósfera y representar gráficamente los resultados.
4. Determinar el coeficiente de dilatación lineal de cuerpos sólidos mediante el aparato de Fuess.
5. Determinar el coeficiente de tensión de los gases.

## Cambio de estado de los cuerpos.

### Conversión del estado sólido al líquido y viceversa.

84. Experimento: Calentemos un vaso con naftalina y observemos cuidadosamente su temperatura en un termómetro colocado en ella.

La temperatura sube paulatinamente hasta que se observa que empieza a fundirse la naftalina; desde este momento ( $79^\circ$ ) la tem-

peratura permanece constante durante todo el tiempo que dura la transformación de la naftalina sólida a líquida; terminada dicha transformación, la temperatura comienza nuevamente a subir. Este es el fenómeno llamado **fusión** y la temperatura a la cual se produce es el **punto de fusión**.

Aunque durante la fusión el manantial de calor sigue proporcionándolo como antes, la temperatura no sube, lo que prueba que durante ella hay consumo de calor.

La cantidad de calor que necesitamos para difundir un gramo de un cuerpo sólido se llama su **calor de fusión**.

Tenemos así las dos leyes fundamentales de la fusión:

**I. Cada cuerpo se funde siempre a la misma temperatura, que permanece constante durante todo el tiempo que dura la fusión y que se llama punto de fusión.**

**II. Para hacer pasar un cuerpo sólido al estado líquido tenemos que proporcionarle cierta cantidad de calor bien determinada y el calor necesario para fundir 1 [gr] se llama calor de fusión.**

**85. Experimento:** Quitemos el mechero cuando toda la naftalina está líquida y observemos el descenso de la temperatura.

La temperatura baja lentamente hasta llegar a 79°, momento en que aparecen los primeros indicios de naftalina sólida y la temperatura permanece constante durante todo el tiempo que dura la transformación del estado líquido al sólido, aunque el cuerpo sigue perdiendo calor. Esto proviene de que el cuerpo líquido, al pasar al estado sólido, desprende calor que viene a reemplazar al calor perdido. Este es el fenómeno llamado **solidificación** y la temperatura a la cual el termómetro permanece constante se llama **punto de solidificación** y el calor desprendido por 1 [gr] de un líquido al pasar al estado sólido, **calor de solidificación**.

Tenemos dos leyes fundamentales de la solidificación:

**I. Cada cuerpo se solidifica siempre a la misma temperatura que permanece constante durante todo el tiempo que dura la solidificación, y esta temperatura se llama punto de solidificación.**

**II. Al pasar un cuerpo líquido al estado sólido desprende cierta cantidad de calor y el calor desprendido por 1 [gr] se llama calor de solidificación.**

Comparando los puntos de fusión y de solidificación, se encuentra que son idénticos y por este motivo basta determinar uno solo de ellos y en la práctica se prefiere el punto de solidificación, porque un cuerpo se enfría más regularmente que lo que se calienta.

He aquí los puntos de fusión o de solidificación de los cuerpos más importantes:

éter	—118°	aluminio	+ 657°
sulfuro de carbono	—113°	latón	+ 900°
alcohol	—110°	plata	+ 961°
toluol	—102°	oro	+1064°
anhidrido carbónico	— 57°	cobre	+1080°
mercurio	— 39,5°	hierro fundido	+1200°
agua	0°	acero	+1375°
naftalina	+ 79°	níquel	+1480°
azufre	+114°	paladio	+1540°
estaño	+232°	hierro batido	+1600°
bismuto	+269°	platino	+1720°
plomo	+327°	iridio	+2200°
zinc	+419°	tántalo	+2200°

También se ha encontrado que el calor de fusión de una substancia es igual a su calor de solidificación.

**86. Experimento:** Calentemos grasa o mantequilla observando el termómetro.

La temperatura sube y en ningún momento queda fija; la fusión se produce lentamente y el cuerpo pasa por diversos grados de viscosidad; tales substancias no tienen punto de fusión determinado y por lo mismo no es posible determinar su calor de fusión; otra substancia de este tipo es el vidrio.

**87. Experimento:** Enfriemos agua en una ampolla de vidrio con un termómetro y observemos hasta qué temperatura mínima podemos llegar sin que se congele el agua, pero cuidando que quede en el reposo más completo.

La temperatura baja hasta  $-8^{\circ}$  y el agua se mantiene líquida. Este fenómeno se llama **sobre-enfriamiento**.

Pero tan luego como movemos la ampolla, el agua se solidifica de golpe y la temperatura salta bruscamente a  $0^{\circ}$ , esta elevación de temperatura se debe al calor de solidificación que queda libre en el momento mismo en que se produce el cambio de estado.

Este mismo fenómeno se puede observar en el hiposulfito y en el acetato de sodio fundidos, que se enfrían hasta la temperatura ambiente, aunque su punto de solidificación es de  $48^{\circ}$ ; al echarle un pedacito de la sal, la solidificación es instantánea y la temperatura salta a  $48^{\circ}$  (¿por qué?). El calor que queda libre se puede sentir tocando el matraz con la mano.

Las mezclas de algunos elementos, llamadas también aleaciones, tienen un punto de fusión más bajo que cada uno de sus componentes, por ejemplo, la aleación de **Rose**, compuesta de 49% de bismuto ( $269^{\circ}$ ), 23,5% de estaño ( $332^{\circ}$ ) y 27,5% de plomo ( $327^{\circ}$ ) tiene un punto de fusión de  $90,25^{\circ}$ . La aleación de **Wood** que consiste en: 56% de bismuto, 13,5% de estaño, 13,5% de plomo y 17% de cadmio tiene un punto de fusión de  $68^{\circ}$ .

Basta echar un pedazo de estas aleaciones en agua hirviente para que se fundan.

La soldadura que emplean los hojalateros se compone de 2 partes de plomo y 1 de estaño y tiene su punto de fusión a  $194^{\circ}$ .

La soldadura debe tener siempre un punto de fusión más bajo que el de los metales que se quiere soldar y por este motivo tal soldadura se presta muy bien para soldar zinc.

### Cambio de volumen producido por la fusión.

**88. Experimento:** Fundamos una cantidad de parafina sólida, echemos después un pedazo de parafina sólida a la líquida y veamos si flota o se va al fondo.

El pedazo se va al fondo lo que nos indica que su densidad es mayor; se deduce de esto que la parafina al fundirse, sufre un aumento de volumen, lo que era fácil suponer ya que los cuerpos se dilatan por el calor.

**89. Experimento:** Echemos un pedazo de hielo al agua y observemos lo mismo que en el experimento anterior.

El hielo no se va al fondo sino que flota; en este caso se produce disminución de volumen al fundirse. En realidad,  $1\ 000\text{ [cm}^3\text{]}$  de hielo se reducen a  $910\text{ [cm}^3\text{]}$  de agua.

El caso general es que los cuerpos se dilatan al fundirse; hacen excepción a esta regla entre otros el agua, el bismuto y el fierro.

**90. Experimento:** Llenemos una esfera hueca de fierro de  $1\text{ [cm]}$  de espesor con agua y cerrémosla herméticamente por medio de un tornillo; sumerjámosla en seguida en una mezcla frigorífica de  $-20^{\circ}$ .

Después de cierto tiempo se produce la explosión de la bola. El agua al solidificarse se dilata con una fuerza tan enorme, que las paredes gruesas de la bola no la pueden resistir.

Este experimento explica fácilmente la destrucción de las rocas en las cordilleras: el agua que llena sus intersticios se solidifica en los grandes fríos y las rompe. También se congela en el invierno la savia de las plantas y se destruyen sus tejidos: las plantas se queman.

### Influencia de la presión sobre el punto de fusión.

**91. Experimento:** A un trozo de hielo sostenido por sus extremos coloquémosle un alambre a su alrededor y pendiente de éste un peso de  $5\text{ [kg]}$ .

El alambre va penetrando lentamente en el hielo sin dejar hueca alguna, hasta caer al otro lado.

Si el alambre hubiera penetrado en el hielo a causa del peso que sostiene, lo habría cortado en dos pedazos.

La explicación es otra: la presión que existe bajo el alambre, impide que el agua debajo de él permanezca sólida a  $0^{\circ}$  y se funde, el alambre pasa, pero cuando el agua se encuentra sobre él, sólo está sometida a la presión atmosférica y vuelve a congelarse a  $0^{\circ}$ , de mo-

do que al fin forma como antes un solo trozo. Este fenómeno, llamado **rehielo**, nos deja ver que la presión influye sobre el punto de fusión del agua; lo mismo sucede a las otras substancias.

El aumento de presión produce en el agua y en los demás cuerpos que se contraen por fusión, un descenso y en los cuerpos que se dilatan al fundirse una elevación de su punto de fusión. Esta variación es muy pequeña. En el agua el aumento de 1 atmósfera en la presión, produce un descenso de  $0,0075^\circ$ , de modo que a una presión de 1 000 atmósferas, el punto de fusión está a  $-7,5^\circ$ . La parafina a 1 atmósfera de presión se funde a  $46,3^\circ$ ; a 85 atmósferas a  $48,9^\circ$  y a 100 atmósferas a  $49,9^\circ$ .

Por la influencia de la presión sobre el punto de fusión del agua se explica también el avance de los ventisqueros. Las grandes masas de nieve que caen sobre el hielo lo comprimen y lo obligan a pasar al estado líquido; el agua corre y se rehíela cuando está libre de la presión de la nieve.

## Disolución.

**92. Experimento:** Pongamos un puñado de sal de amoníaco ( $\text{Cl NH}_4$ ) en agua y observemos el termómetro que se encuentra en ella.

La sal desaparece: las moléculas del cuerpo sólido se separan y se reparten de tal modo en el líquido que se hacen invisibles. Este fenómeno se llama **disolución**.

Además observamos un descenso de temperatura. La sal para poder pasar al estado líquido o, como decimos, para poder **disolverse**, necesita calor como cualquier cuerpo que se funde y, como no le proporcionamos este calor, la sal lo toma del agua en que se disuelve y por este motivo baja la temperatura del disolvente.

**93. Experimento:** Echemos más sal amoníaco al agua del experimento 92 y observemos si el termómetro sigue bajando.

Veremos que luego la temperatura no baja, pero que tampoco se disuelve la sal. Un líquido no puede disolver sino cierta cantidad determinada de sal y si ésta se ha disuelto, se dice que la disolución está **saturada**. Se obtiene la temperatura más baja posible cuando se toma tal cantidad de sal que se sature el agua. Disolviendo una cantidad de nitrato de amonio ( $\text{NO}_3 \text{NH}_4$ ) en igual cantidad de agua, se obtiene un descenso de temperatura de  $27^\circ$ .

**94. Experimento:** Determinemos el punto de solidificación de una disolución de cloruro de sodio (sal marina) en agua, enfriándola por medio de una mezcla frigorífica.

Las disoluciones en agua tienen un punto de solidificación más bajo que el agua pura y este descenso depende del grado de la concentración. El agua del mar que contiene  $3,5\%$  de sales se congela a  $-2,5^\circ$  y una disolución saturada de sal marina ( $33\%$ ) a  $-22^\circ$ .

Mientras que una mezcla de agua con hielo posee siempre la temperatura de  $0^{\circ}$ , la de una disolución, en la que se funde hielo, baja hasta su punto de solidificación, de modo que podemos obtener una temperatura de  $-22^{\circ}$  cuando echamos hielo machacado a una disolución saturada de sal marina. Más no puede bajar la temperatura, porque al enfriar más la disolución, una parte del agua vuelve a congelarse con la sal y el calor que se desprende en este proceso hace subir la temperatura hasta el punto de solidificación de la disolución.

En vez de preparar primero la disolución saturada y echar el hielo después, podemos también mezclar directamente hielo machacado y sal, puesto que parte del hielo en contacto con la sal se convierte en agua en la que se disuelven la sal y el hielo. Eligiendo las cantidades en tal proporción que la sal sature al agua que proviene de la fusión del hielo, obtenemos la temperatura más baja posible, igual al punto de solidificación de la disolución saturada. Para comprobarlo vamos a hacer el

95. **Experimento:** Mezclemos bien 1 parte de sal marina con 2 partes de hielo machacado y observemos la temperatura más baja que resulta.

Como las cantidades mezcladas casi dan una disolución saturada, obtenemos una temperatura mínima de  $-20^{\circ}$ , casi igual a su punto de solidificación.

Esta mezcla frigorífica se usa siempre en las confiterías para la fabricación de los helados.

Otra menos usada a causa de su mayor precio consta de 1 parte de hielo y 2 de cloruro de calcio y produce una temperatura de  $-42^{\circ}$ .

Muchas sustancias son insolubles en el agua, pero son solubles en otros líquidos, tales como alcohol, éter, sulfuro de carbono, y para estas disoluciones rigen las mismas leyes.

96. **Experimento:** Sometamos un poco de sulfato de cobre a una alta temperatura hasta convertirlo en una sal con apariencia de ceniza y cuando esté fría pongámosla en un vaso con agua y observemos la temperatura.

Esta vez la temperatura sube, lo que parece estar en contradicción con lo dicho anteriormente. Pero en este caso no hay sólo una disolución, sino una reacción química. La sal primero se combina con el agua y por esta combinación se produce calor, que se llama **calor de hidratación**; después tiene lugar la disolución y se produce frío. Según que el calor producido por la reacción química sea mayor, igual o menor que el consumido por la disolución, habrá elevación, mantención o descenso de la temperatura.

### Conversión del estado líquido al gaseoso y viceversa.

Si calentamos un líquido, se dilata y a cierta temperatura se transforma en vapor. Decimos entonces que el líquido hierve: se ve subir a la superficie muchas burbujas que agitan con violencia

el líquido. Por conducción continua del calor se puede convertir todo el líquido a vapor. Este fenómeno se llama **ebullición**.

Pero no solamente a la temperatura de ebullición pasa un líquido al estado gaseoso, sino también a cualquiera temperatura mucho más baja. Colocando, por ejemplo, una cápsula con agua en el aire, vemos que la cantidad disminuye continuamente. Esta transformación se llama **evaporación**.

Los dos pasos del estado líquido al gaseoso, se designan con el término general de **vaporización**. Al revés, si se enfría un vapor baja primero la temperatura, pero cuando llega a cierto valor queda constante mientras que el vapor pasa al estado líquido. Este proceso se llama **condensación** y la temperatura a la cual tiene lugar, **punto de condensación**.

Para conocer las cualidades de los vapores, vamos a evaporar los líquidos en espacios vacíos.

**97. Experimento:** Preparemos 4 barómetros de cubeta e introduzcamos en tres de ellos sucesivamente algunas gotas de agua, alcohol y éter, dejando el cuarto para hacer comparaciones (fig. 66).

Los niveles del mercurio en los tres tubos con líquido bajan instantáneamente, pero de una manera distinta: el agua produce un pequeño descenso, el alcohol uno mayor y el éter uno mucho mayor aún. Si repetimos varias veces la experiencia anterior en igualdad de condiciones veremos que un mismo líquido produce siempre el mismo descenso.

Lo que hace bajar el mercurio no puede ser el peso del líquido introducido, porque éste es casi insignificante, sino que proviene de los vapores que se han formado en el vacío y que ejercen presión sobre el mercurio. Esta presión se llama **tensión** y puede medirse en milímetros de mercurio comparando cada uno de los tubos que contiene vapor con el que no lo contiene. Si éste marca, por ejemplo, una presión de 713 [mm] y el tubo con éter una de 420, la tensión del vapor de éter es de  $713 - 420 = 293$  [mm]. (Mídase la tensión de los vapores de agua y de alcohol).

Cuando se introducen nuevas porciones de éter en el tubo se ve que permanece constante la columna de mercurio y el éter introducido se conserva líquido; no puede evaporarse más porque el espacio no puede contener más vapor. Se dice en este caso que **el espacio está saturado** y el vapor que satura este espacio, se llama **vapor saturado**.

El carácter exterior de la saturación es la presencia de un exceso de líquido en contacto con sus vapores y, como la tensión de los

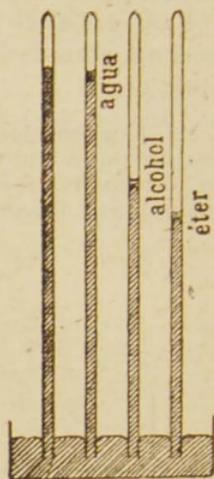


Fig 66

vapores no aumenta más, se dice que el vapor ha alcanzado su **tensión máxima**. Hemos obtenido así la ley importante: **Cada vapor saturado posee una tensión máxima propia**.

Para ver si el vapor saturado se porta como un gas, cuando le damos oportunidad de ocupar un volumen mayor o menor, vamos a hacer el

98. **Experimento:** Introduzcamos el tubo barométrico con éter del experimento anterior en una cubeta profunda, marquemos por un índice el nivel del mercurio y observemos si éste varía cuando bajamos o levantamos el tubo (fig. 67), disminuyendo o aumentando el volumen que ocupa el vapor saturado.

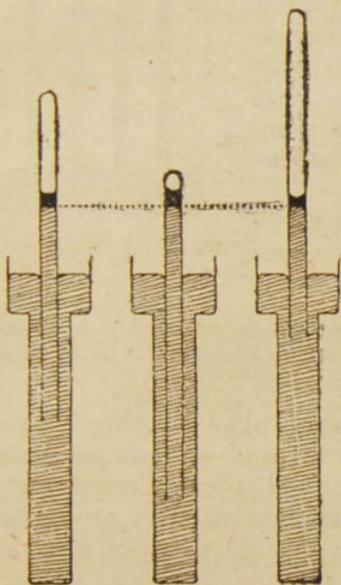


Fig. 67

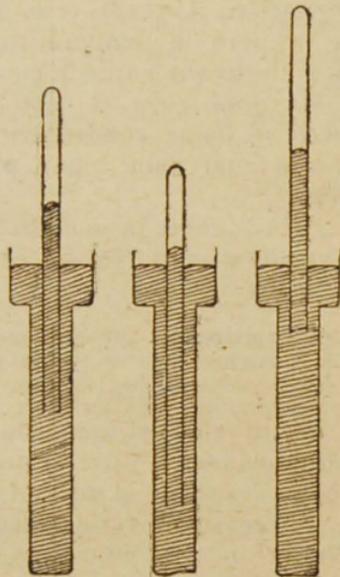


Fig. 68

El nivel permanece fijo sea cual fuere el volumen, lo que nos dice que la **tensión de los vapores saturados es independiente del volumen que ocupan**.

Examinando más detalladamente este fenómeno se verá que al disminuir el volumen la cantidad de éter aumenta, porque una parte del vapor vuelve a pasar al estado líquido y en el segundo caso se verifica lo contrario, el líquido disminuye porque una parte se evapora para saturar el espacio que es ahora mayor. Vemos que **necesitamos una cantidad bien determinada de vapor para saturar un espacio dado**; si se aumenta el espacio, esta cantidad de vapor será insuficiente para saturarlo y la tensión tendría que disminuir, pero en este caso se evapora más líquido hasta la saturación del volumen y se restablece la tensión inicial. Disminuyendo el volumen, la cantidad de vapor sería demasiado grande y por esto aumentaría la

tensión, pero ahora el exceso de vapor pasa al estado líquido y resta sólo el vapor suficiente para saturar el volumen reducido.

Con los gases no sucede lo mismo. Para recordar la ley según la cual su tensión varía juntamente con el volumen, repitamos un experimento de la mecánica.

**99. Experimento:** Sumerjamos un tubo barométrico graduado que contenga un poco de aire en una cubeta profunda y midamos los volúmenes que ocupa el aire y las columnas correspondientes de mercurio, bajando a subiendo el tubo (fig. 68).

El nivel varía y el producto del volumen por su tensión que es igual a la presión atmosférica menos la columna de mercurio, resulta siempre constante: es la ley de Mariotte.

**100. Experimento:** Repitamos el experimento 98, empleando esta vez un tubo vacío al cual se ha introducido una cantidad muy pequeña de éter, pero suficiente para saturar todavía el espacio (¿cómo lo sabremos?), observemos, subiendo el tubo, como varía el nivel, cuando ha desaparecido la última cantidad del líquido y midamos los volúmenes que ocupa el vapor y las columnas de mercurio correspondientes.

Al principio permanece fijo el nivel, hasta que levantando más el tubo, llegue el momento en que todo el líquido se haya evaporado. Levantando más aun el tubo, aumenta todavía el volumen, no hay más líquido que pueda evaporarse y saturar el espacio mayor. Decimos entonces que **el vapor no está saturado**. También vemos que el nivel del mercurio sube. Formando cada vez el producto del volumen ocupado por el vapor y de su tensión correspondiente, resulta constante, es decir, que los vapores no saturados siguen la ley de Mariotte. Pero no solamente esta ley rige para los vapores no saturados sino que todas las otras que ya hemos conocido para los gases, por ejemplo, la ley de Gay-Lussac, de modo que no hay diferencia alguna entre los gases y los vapores no saturados. También vemos que la tensión del vapor no saturado es siempre menor que la del vapor saturado, al cual corresponde la tensión máxima.

**101. Experimento:** Sumerjamos poco a poco el tubo con vapor no saturado del experimento anterior, en la cubeta y observemos el nivel y lo que sucede con el vapor cuando el nivel queda fijo.

El nivel baja al principio porque el volumen disminuye y según la ley de Mariotte la tensión aumenta; el vapor no está todavía saturado; pero disminuyendo más el volumen, el vapor será al fin suficiente para saturar el espacio menor, tenemos entonces vapor saturado; disminuyendo aun más el volumen, vemos que el vapor vuelve al estado líquido y permanece constante el nivel del mercurio.

Hasta ahora sólo hemos estudiado la influencia del volumen sobre los vapores considerando constante la temperatura, pero vere-

mos que la tensión máxima y la cantidad necesaria para saturar un espacio dependen considerablemente de ella.

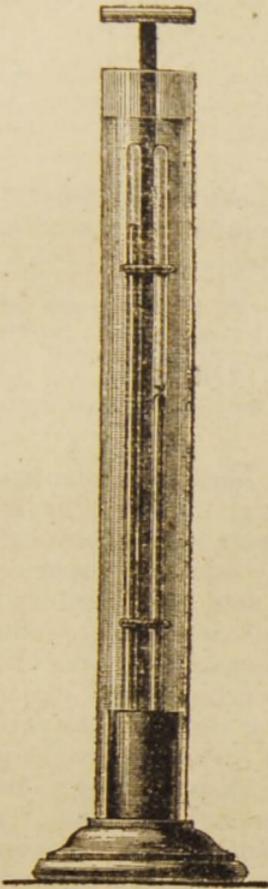


Fig. 69

**102. Experimento:** Introduzcamos una cubeta con 2 barómetros de los cuales uno contiene éter, en un tubo más ancho con agua y observemos la diferencia de los dos niveles la que nos indica la tensión del vapor saturado, elevando gradualmente la temperatura del agua hasta que hierva el éter (fig. 69),

**La tensión máxima de los vapores saturados aumenta con la temperatura y es igual a la presión atmosférica cuando el líquido hierve.**

**103. Experimento:** Echamos una pequeña cantidad de éter en un matraz de 1 litro y tapémoslo muy bien. Introduzcámoslo en seguida en un baño de agua que calentamos primero y enfriamos después y observemos cada vez el volumen del éter.

Veremos que con la elevación de la temperatura la cantidad del éter disminuye lo que nos dice **que necesitamos más vapor para saturar el mismo espacio a temperaturas elevadas.** Elevando bastante la temperatura llega un momento en que desaparece la última cantidad del éter. Hasta aquí hemos tenido en el matraz vapor saturado, pero subiendo ahora un poco más la temperatura, ya no hay líquido disponible para saturar el espacio.

El vapor saturado se ha convertido en vapor no saturado. Enfriando el matraz, a cierta temperatura el vapor será suficiente para saturar el espacio y bajándola más todavía, el vapor pasa al estado líquido.

Para el agua se ha determinado con mucha exactitud la tensión de los vapores a las diferentes temperaturas y las cantidades que se necesitan para saturar un espacio cerrado de 1 [m<sup>3</sup>] y se han obtenido los siguientes valores:

Temperatura	Cantidad	Tensión
0°	4,9 [gr]	4,6 [mm]
10°	9,3 >	9,1 >
20°	17,2 >	17,4 >
30°	30,1 >	31,5 >
40°		54,9 >
50°		92,0 >
60°		148,9 >
70°		233,3 >
80°		355,4 >
90°		525,5 >
100°		760,0 >

Los valores de la tensión se han encontrado por el experimento 102, reemplazando el éter por agua, pero este método no se puede emplear sino hasta la temperatura a la cual hierve el líquido, porque a ésta la tensión es igual a la presión exterior, y a una temperatura más alta el vapor escaparía del tubo.

Por este motivo se usa el aparato que indica la fig. 70. Consiste en un tubo encorvado en forma de U, la rama más corta es más ancha y contiene agua sin aire y mercurio. Calentando el agua hasta que hierva, introduciendo el aparato en un baño de aceite, los niveles del mercurio en las dos ramas deben encontrarse en la misma línea horizontal y la tensión es igual a la presión atmosférica. Calentando más, la tensión aumenta y el mercurio sube en la rama más larga. Anotando la temperatura del baño y la diferencia de niveles que hay que agregar a la presión atmosférica, se encuentra la tensión que corresponde a la primera. Así se han obtenido los valores siguientes:

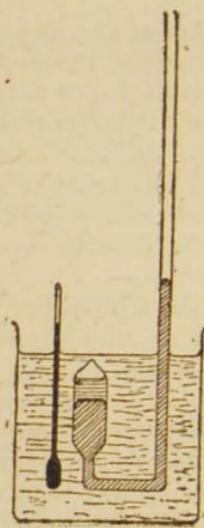


Fig. 70

100°	1 atm. = 760 [mm]	152,2°	5 atm.
111,7°	1,5 >	180,3°	10 >
120,6°	2 >	213°	20 >
127,8°	2,5 >	236,2°	30 >
133,9°	3 >	252,5°	40 >
139,2°	3,5 >	265,9°	50 >
144°	4 >		

Resumiendo los resultados anteriores, podemos distinguir:

**I. Los vapores saturados que tienen una tensión máxima que es independiente del volumen que ocupan y que depende de la temperatura.**

II. Los vapores no saturados que tienen siempre una tensión menor que la de los vapores saturados y que varía con el volumen según la ley de Mariotte y con la temperatura según la ley de Gay-Lussac.

Los vapores saturados se convierten en no saturados, esparciéndolos en un espacio mayor o elevando la temperatura (o haciendo ambas cosas a la vez); el proceso inverso convierte los vapores no saturados en vapores saturados.

## Ebullición.

**104. Experimento:** Coloquemos sobre la llama de un mechero un vaso o matraz con agua y observemos atentamente los fenómenos que se producen y la temperatura.

Apenas se ha entibiado el vidrio, se cubre interiormente de burbujas que se ensanchan y suben saliendo del líquido; tales burbujas no son de vapor sino formadas por los gases disueltos en el agua y que se dilatan por el calor; son las mismas burbujas que cubren en los días de calor la superficie interior de las botellas que contienen agua. Más tarde se forman burbujas en la capa líquida que está en contacto con el fondo; éstas suben, pero al encontrarse con las capas frías de la parte superior, se condensan y desaparecen sin salir a la superficie.

Tales burbujas son de vapor; la formación y condensación sucesiva de ellas producen un ruido característico y decimos que el **agua suena**. Por fin las capas superiores se calientan también, las burbujas se desprenden en mayor cantidad y, no pudiendo condensarse, salen a la superficie sacudiendo violentamente el líquido: el **agua hierve**. Observando la temperatura, veremos que el termómetro permanece constante mientras dura la ebullición. Este punto lo llamamos **punto de ebullición**. La temperatura queda constante aunque aportemos más calor, de lo que se desprende que todo el calor aportado se emplea en convertir el líquido a vapor.

La cantidad de calor necesaria para evaporar 1 [gr] de un líquido se llama **calor de vaporización**.

Hemos obtenido las siguientes leyes para la ebullición:

I. Cada líquido hierve a una temperatura bien determinada que permanece constante mientras dura la ebullición y que se llama su punto de ebullición.

II. Cada líquido para poder pasar al estado gaseoso necesita calor y el calor necesario para transformar 1 [gr] de un líquido a vapor de igual temperatura se llama su calor de vaporización.

Si, al revés, se dejan enfriar los vapores de alta temperatura llega un momento en que la temperatura queda fija y el vapor pasa al estado líquido; tal fenómeno es la **condensación** de los vapores y

su temperatura el **punto de condensación**. La temperatura no sigue bajando porque el cuerpo durante la condensación deja libre cierta cantidad de calor.

Rigen para la condensación las siguientes leyes:

**I.** Cada vapor pasa al estado líquido a una temperatura bien determinada que permanece constante mientras dura la condensación y que se llama punto de condensación.

**II.** Cada vapor al pasar al estado líquido desprende calor y el calor desprendido por 1 [gr] de vapor se llama calor de condensación.

Por la experiencia se ha encontrado que los puntos de ebullición y de condensación son idénticos y que el calor liberado en la condensación es igual al calor consumido en la ebullición.

### Influencia de la presión exterior sobre el punto de ebullición.

Por el experimento 102 ya sabemos que un líquido hierve, cuando la tensión de sus vapores es igual a la presión exterior, de modo que el punto de ebullición del mismo líquido tiene que subir o bajar según que la presión exterior aumente o disminuya, como se puede ver en el cuadro siguiente:

<i>b</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>t</i>
760	100°	720	98,49°
750	99,63°	710	98,11°
740	99,26°	700	97,71°
730	98,88°	690	97,32°

Vamos a estudiar esta relación de otra manera.

**105. Experimento:** Calentemos agua hasta que hierva; coloquémosla con un termómetro bajo un recipiente de una máquina neumática; dejémosla enfriar sucesivamente hasta 90°, 80° y 70° y extraigamos cada vez aire hasta que hierva el agua y anotemos la presión a la cual está sometida en estos momentos.

Vemos que el agua hierve a 90° si la presión es igual a 525,9 [mm], a 80° si la presión es de 355,5 [mm] y a 70° cuando la presión es de 233,8 [mm].

Si se habla ordinariamente del punto de ebullición, se supone siempre que el líquido está sometido a la presión normal y designamos este punto con el nombre de **punto de ebullición normal**.

Para determinar el punto de ebullición se calienta el líquido en un matraz provisto de un tubo lateral para la salida del vapor, hasta

que hierva y se anota la temperatura que permanece constante. El termómetro no debe sumergirse en el líquido, sino que debe encontrarse expuesto sólo a sus vapores porque las sales disueltas en el líquido, producen una elevación del punto de ebullición. Si la presión exterior durante la determinación ha sido igual a 760 [mm], obtenemos directamente el punto de ebullición normal, si no, podemos aplicar una fórmula empírica que permite deducirlo del punto de ebullición observado a la presión atmosférica  $b$ . La fórmula es:

$$t_{760} = 0,00011 (t + 273) \cdot (760 - b) + t$$

De esta manera se han encontrado los siguientes valores:

Helio	— 269,0°	Alcohol	+ 78,3°
Hidrógeno	— 252,6°	Agua	+ 100,0°
Nitrógeno	— 195,7°	Anilina	+ 184,2°
Aire	— 193,0°	Naftalina	+ 218,0°
Oxígeno	— 182,8°	Mercurio	+ 357,0°
Anhidrido carbónico	— 78,2°	Zinc	+ 918,0°
Eter	+ 34,5°		

Como sabemos del experimento 102 que un líquido hierve si la tensión de sus vapores es igual a la presión exterior, podemos definir también el punto de ebullición normal de la manera siguiente:

**El punto de ebullición normal de un líquido es aquella temperatura a la cual la tensión máxima de sus vapores es igual a 760 [mm].**

Si subimos a una montaña disminuye la presión atmosférica y por este motivo tiene que bajar el punto de ebullición. Conociendo bien la relación entre la presión atmosférica y el punto de ebullición podemos aprovechar éste para determinar la primera, y en esto se funda un aparato llamado **hipsómetro**, que sirve para medir alturas. El hipsómetro consiste en una pequeña caldera con agua y en cuyos vapores se introduce un termómetro de gran precisión que aprecia hasta los centésimos de grado.

Para medir la altura de una montaña, se determina por el hipsómetro el punto de ebullición del agua abajo y arriba. En seguida se busca en tablas las presiones atmosféricas correspondientes ( $b_0$  y  $b_1$ ) y se las substituye en la fórmula empírica:

$$h = 18450 (\log b_0 - \log b_1) \cdot (1 + 0,0045 t)$$

en la que  $t$  significa la temperatura media entre las de abajo  $t_0$  y arriba  $t_1$ .

$$t = \frac{t_0 + t_1}{2}$$

## Caldera.

Al calentar el agua en vasos abiertos sólo podemos conseguir una tensión máxima igual a la presión atmosférica y el punto de ebullición que le corresponde. Si queremos tener valores más altos tenemos que emplear vasos cerrados o **calderas** (fig. 71). En ellos los primeros vapores que se forman, aumentan la presión ejercida sobre el agua y por eso el calor que sigue recibiendo eleva más la temperatura.

Por una válvula de seguridad podemos regular la presión sobre el agua y así subir y bajar el punto de ebullición a voluntad. Fuera de la válvula lleva la caldera un manómetro metálico que nos da a conocer en cada momento la presión interior; un grifo para la salida del vapor; una probeta con mercurio, que se introduce en la caldera y un termómetro que nos permite comprobar la relación entre la tensión interior y la temperatura correspondiente; a veces el termómetro tiene doble graduación, una para las temperaturas y otra para las presiones.

En regiones muy altas no se pueden preparar muchas comidas, como por ejemplo la carne, en ollas abiertas, porque estos alimentos exigen una temperatura más alta que el punto de ebullición que reina a esas alturas. Se usa por este motivo recipientes cerrados con válvula que, en honor a su inventor, se llama **marmitas de Papin**.

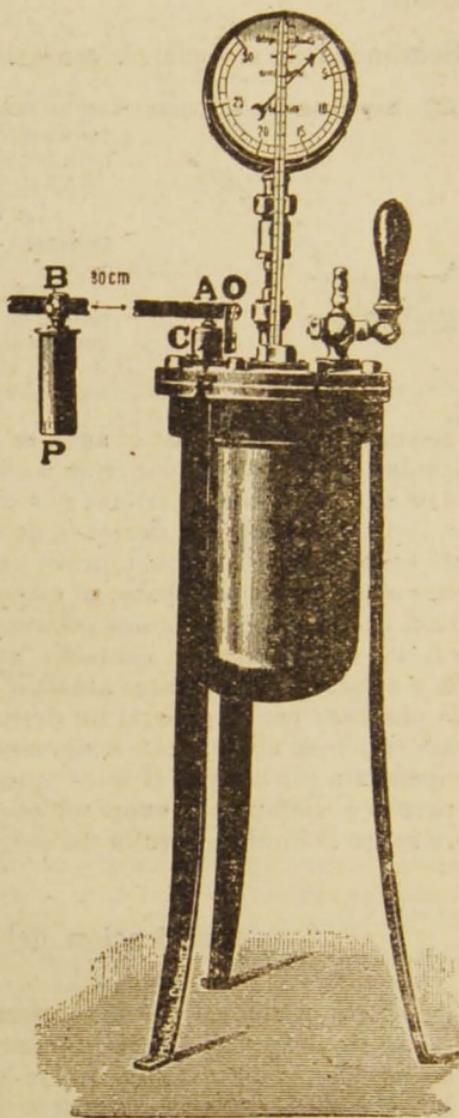


Fig 71

## Evaporación.

106. **Experimento:** Echamos algunas gotas de éter sobre la mano y soplamos sobre el éter.

Sentimos frío; al soplar, la sensación de frío aumenta.

107. **Experimento:** Coloquemos en un vaso con éter un termómetro y observemos el descenso de temperatura mientras pasa por el éter una corriente de aire.



Fig. 72

La temperatura baja rápidamente hasta  $-20^{\circ}$ .

108. **Experimento:** Pongamos sobre un pedazo de madera un poco de agua y coloquemos sobre ella una cápsula metálica llena de éter que hacemos evaporar muy ligero, soplándolo (fig. 72).

Resulta un frío tal que el agua se congela y podemos levantar la cápsula con la madera adherida a ella.

Los experimentos anteriores nos muestran que la evaporación de un líquido produce un descenso de temperatura o, como se dice, **frío de evaporación**. En la ebullición ya hemos visto que un líquido necesita calor para poder pasar al estado gaseoso y, como en la evaporación no le proporcionamos calor al líquido, lo quita a los cuerpos con los cuales está en contacto, enfriándose así el líquido que queda y el vaso. En los vasos abiertos que contienen líquido no se puede observar por lo general un descenso de temperatura, porque la evaporación se efectúa tan lentamente que siempre se restablece la temperatura inicial por el calor que recibe de los cuerpos vecinos; pero si aceleramos la evaporación dejando pasar una corriente de aire sobre el líquido, resulta un enfriamiento muy grande.

## Fabricación del hielo.

En el **frío producido por la evaporación**, se basa un método que hoy día se emplea mucho para fabricar hielo.

La fig. 73 nos da un esquema de la instalación.

La caldera *A*, contiene amoníaco líquido y está en comunicación con una bomba *P* mediante un sistema de tubos *R*, que se encuentra en un baño de una disolución concentrada de cloruro de calcio, llamada **refrigerante**. La bomba *P* aspira por el lado del serpentín *R* y comprime por el otro. Abriendo la llave *H* el amoníaco líquido sale de la caldera *A* y dentro de los tubos *R* se evapora rápi-

damente, por lo cual se produce un gran frío que hace bajar la temperatura del refrigerante. La máquina aspira los vapores de amoníaco y los comprime nuevamente en los tubos *K*, que se encuentran en agua fría corriente, hasta que se liquiden. El amoníaco

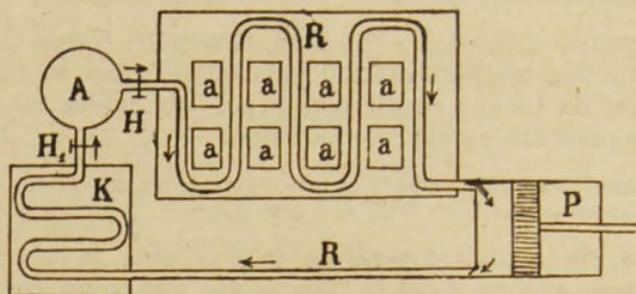


Fig. 73

co líquido pasa por la llave  $H_1$  a la caldera y puede ser aprovechado otra vez para enfriar más el refrigerante. Cuando la temperatura del baño de cloruro de calcio ha bajado hasta  $-15^\circ$  se introduce una serie de moldes de zinc, *a*, llenos de agua, la que se congela rápidamente.

Para poder sacar el hielo de los moldes se los sumerge un momento en agua caliente; como el zinc se dilata primero, el hielo se separa de las paredes y sale fácilmente.

### Evaporación del anhídrido carbónico líquido.

Un líquido que se evapora con gran rapidez es el anhídrido carbónico que se guarda por esa misma causa encerrado en tubos de fierro resistentes y sometido a gran presión. Si se coloca uno de estos tubos con su salida hacia abajo y se abre la llave, al salir el líquido la evaporación es tal y tan grande el descenso de temperatura, que una parte del anhídrido carbónico líquido se solidifica. Colocando una bolsa de paño se puede recoger dicha substancia sólida y, aunque su temperatura es de  $-58^\circ$ , es posible soportar pedacitos sobre la mano, porque su propio gas forma una capa aisladora entre la mano y el anhídrido carbónico. Su aspecto se asemeja a la nieve y pasa directamente al estado gaseoso sin liquidarse.

**109. Experimento:** Mezelemos anhídrido carbónico sólido y éter y observemos la temperatura más baja que resulta.

La temperatura baja hasta  $-80^\circ$ ; el anhídrido carbónico para poder disolverse necesita calor que saca del éter por lo que se produce el descenso de la temperatura.

110. **Experimento:** Cubramos el mercurio que se encuentra en una cápsula de porcelana con esta mezcla frigorífica.

El mercurio luego se congela por tener un punto de solidificación igual a  $-39^{\circ}$ .

111. **Experimento:** Sumerjamos el mercurio sólido en agua.

El mercurio comienza a fundirse; al caer en forma de chorros tiene todavía una temperatura tan baja que el agua se congela formando tubos de hielo a su alrededor por los cuales se escurre el mercurio y presenta un aspecto llamativo.

112. **Experimento:** Echemos la mezcla frigorífica en una cápsula calentada al rojo e introduzcamos en ella un dedal con mercurio.

A pesar de la alta temperatura de la cápsula, la mezcla frigorífica dura largo tiempo, pues la capa de gas que se produce sirve de aislador térmico y la mezcla no entra en contacto directo con la cápsula y por este motivo se solidifica también el mercurio en el dedal.

## Condensación de los vapores.

La condensación es el proceso inverso de la vaporización, o sea, el paso de un cuerpo del estado gaseoso al líquido.

Los vapores los podemos condensar bajando la temperatura o disminuyendo su volumen aumentando la presión exterior, o aplicando los dos métodos al mismo tiempo.

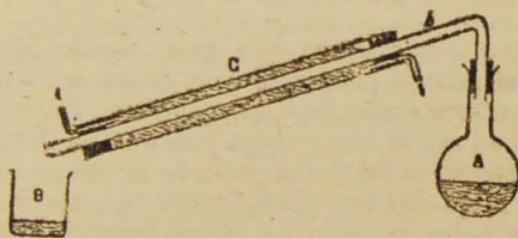


Fig. 74

En la combinación de la vaporización y la condensación se funda la **destilación** que se aplica para la preparación de líquidos puros.

La fig. 74 muestra un aparato de destilación de Liebig.

El líquido que puede contener impurezas como el agua potable se calienta hasta la ebullición en el vaso A. Los vapores pasan por el tubo b, donde se condensan por el agua fría que circula en el tubo más ancho c, y el agua condensada se recoge en el vaso B.

Para la producción de grandes cantidades de líquidos puros se usan aparatos llamados alambiques, cuyo funcionamiento se entiende fácilmente por la fig. 75.

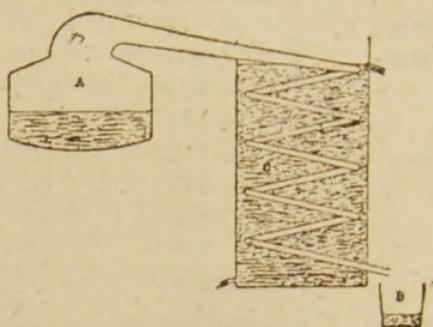


Fig. 75

### Condensación o licuación de los gases.

Al tratar de los vapores hemos visto que los no saturados siguen las mismas leyes que rigen para los gases. Por esto algunos físicos pensaron que los gases eran idénticos a los vapores no saturados con la única salvedad de encontrarse lejos de la saturación. Siendo esto así, pensaron, debe ser posible llevarlos a la saturación primero y licuarlos en seguida. Para conseguirlo habría que reducir su volumen (sometiéndolos a fuertes presiones) y bajar su temperatura.

Los primeros ensayos felices los hizo **Faraday** en el año 1823 y consiguió la licuación de todos los gases conocidos en ese tiempo, exceptuando el oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y aire. **Natterer** tampoco consiguió la licuación de estos gases aunque aplicó una presión de 3 000 atmósferas, y por este motivo se creía que era imposible licuarlos y se les llamó **gases permanentes**. Pero en el año 1875 el físico inglés **Andrews** demostró que existe una temperatura máxima sobre la cual es imposible licuar el gas y la llamó **temperatura crítica**. Para el agua, por ejemplo, la temperatura crítica es de  $+365^{\circ}$ , es decir, que a una temperatura superior a  $+365^{\circ}$  es imposible obtener agua líquida, sea cual fuere la presión. El anhídrido carbónico no puede licuarse a más de  $+32^{\circ}$ .

Una vez conocida la existencia de la temperatura crítica, los físicos **Cailletet** y **Pictet** y más tarde **Wroblewski** y **Olszewski** procuraron licuar los gases permanentes, pero sólo consiguieron cantidades insignificantes, teniendo que vencer grandes dificultades a causa de la temperatura crítica tan baja de estos gases, de modo que todas estas experiencias sólo llenaban un fin científico.

Si el gas está a la temperatura crítica, necesita cierta presión fija para licuarse y se la llama **presión crítica**. Si la temperatura es más baja que la crítica la presión también es menor que la crítica.

Si el gas está sometido a la presión y temperatura críticas se dice que está en su **estado crítico**.

Por las experiencias se han encontrado las siguientes temperaturas y presiones críticas:

gas	temperatura crítica	presión crítica
anhídrido carbónico	+ 32°	75 atm.
» sulfuroso	+155°	80 »
agua	+365°	196 »
amoníaco	+131°	114 »
oxígeno	-118,8°	50,8 »
nitrógeno	-149°	35 »
hidrógeno	-238°	20 »
aire	-140°	39 »
helio	-267,8°	2,3 »

Ul gran progreso para la producción económica de gases licuados se ha obtenido por el invento de **Linde** en 1897.

### Método de Linde.

**113. Experimento:** Comuniquemos dos recipientes *A* y *B* (fig. 76) por un tubo con una llave *O* y con un tubo *C* que permite extraer el aire; coloquemos en *A* el termómetro de gas *E* que indica hasta las más pequeñas variaciones de temperatura por la dilatación o contracción del aire de la esfera; en *B* el mamómetro *D*; extraigamos aire de *B* hasta que la columna de mercurio del manómetro sea igual a 30 [cm], comuniquemos de repente *A* con *B* y observemos el índice del aparato *E*.

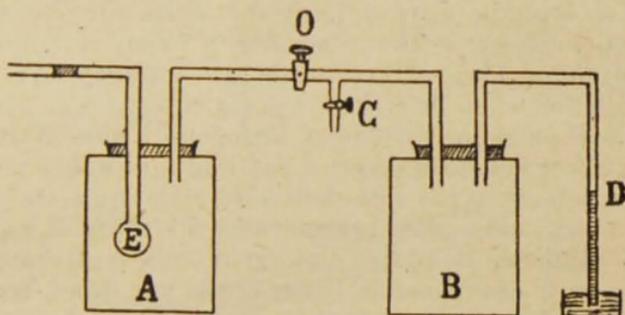


Fig. 76

Como la presión en *A* es mayor que en *B*, el aire pasa de *A* a *B* y el índice de *E* se mueve hacia la derecha indicando un descenso de temperatura en *A*.

En la máquina de Linde se deja pasar una cantidad de aire que se encuentra a la presión de 25 [atm] a un espacio en que hay una presión de 5 [atm] y en este caso el descenso de temperatura que experimenta el gas es de 5°. Para la descripción de la máquina puede servirnos la fig. 77. Una bomba de compresión, *A*, comprime el gas en el tubo *C* (espiral en la práctica), enfriándolo al mismo tiempo en *B* por medio de hielo hasta 0°.

Se abre entonces la llave *C* y el aire se expande en el recipiente *D* y en la espiral envolvente *E*, y la temperatura baja a -5°. Si-

que funcionando la bomba y comprime una nueva cantidad de gas en el tubo *C*, la que se enfría a causa del aire frío de la espiral envolvente *E* que a su vez es aspirado por la bomba; se produce una nueva expansión del aire y su temperatura baja otros 5°. Esto se repite seguidamente y a cada expansión del aire sucede un nuevo descenso de temperatura y al fin ésta llega a ser tan baja que el aire se liquida a la presión a que está sometido y puede recogerse en el recipiente *D*, del cual se saca por una llave.

El aire líquido así obtenido tiene aspecto de leche, porque se encuentran suspendidas en él partículas de anhídrido carbónico sólido; pero filtrándolo, el anhídrido carbónico queda en el filtro y obtenemos un líquido de color azul que se puede conservar durante varios días. La composición del aire líquido no corresponde a la de la atmósfera que consiste en 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno, sino que se compone de 70% de oxígeno y 30% de nitrógeno. Esto proviene de que el nitrógeno se evapora mucho más ligero que el oxígeno. La densidad del aire líquido es casi igual a 1.

Como el aire líquido tiene una temperatura cercana a  $-200^{\circ}$ , no es posible transportarlo en vasos ordinarios, por lo que se usan vasos de Dewar que tienen dobles paredes, siendo vacío el espacio entre ellas. Las paredes son plateadas para evitar un calentamiento desde afuera.

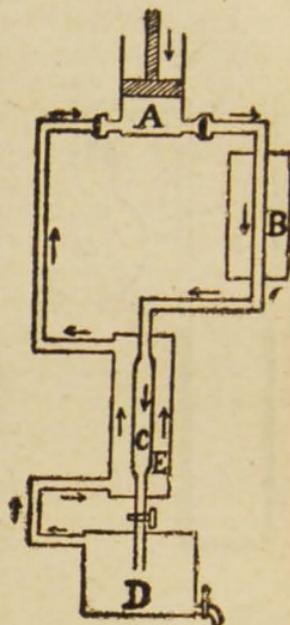


Fig. 77

## Higrometría.

**114. Experimento:** Pongamos un poco de cloruro de calcio en una cápsula y dejémosla durante algún tiempo.

Pronto lo encontraremos disuelto en agua.

En las mañanas frías y claras, las piedras, plantas y demás cuerpos expuestos al aire libre, amanecen mojados: es el **rocío**.

¿De dónde sale esta agua? Evidentemente de la atmósfera. Por la evaporación continua de las aguas esparcidas sobre la superficie del globo, las capas inferiores de la atmósfera están siempre cargadas con vapor de agua, lo que influye mucho en el estado del tiempo. La higrometría tiene por objeto la determinación de las cantidades de vapor de agua contenidas en el aire.

En el estudio de los vapores hemos visto que un espacio vacío sólo puede contener una cantidad bien determinada de vapor y que estos vapores poseen una tensión máxima y ambas aumentan con la

temperatura. Para ver si las mismas leyes rigen también para un espacio lleno de aire, vamos a hacer el

115. Experimento: Comuniquemos un matraz *A* (fig. 78) con un manómetro *B*; introduzcamos éter en el matraz y observemos después de algunos minutos la diferencia de los niveles del manómetro.

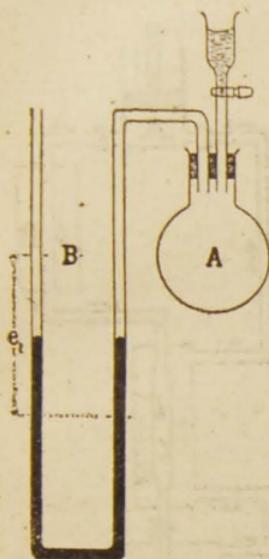


Fig. 78

El éter se evapora como en un espacio vacío, aunque más lentamente y sus vapores alcanzan después de algunos minutos una tensión igual a la que se establece en el vacío y que se agrega a la presión atmosférica. Además podemos mostrar por este experimento que el espacio *A* puede contener la misma cantidad de vapor que si fuera vacío.

Lo mismo rige para cualquier volumen de la atmósfera. Cuando el aire está saturado o casi saturado, decimos que el aire está **húmedo**; si está bastante lejos del punto de saturación, está **seco**.

La cantidad de agua necesaria para saturar 1 [m<sup>3</sup>] de aire se llama **humedad máxima**. Este valor ha sido determinado para las distintas temperaturas con toda precisión y en la tabla siguiente se encuentran los valores para las temperaturas de 1° hasta 30°.

<i>t</i>	hum. máx.	<i>t</i>	hum. máx.	<i>t</i>	hum. máx.
1°	5,2 [gr]	11°	10,0 [gr]	21°	18,2 [gr]
2°	5,6	12°	10,6	22°	19,2
3°	6,0	13°	11,2	23°	20,4
4°	6,4	14°	12,0	24°	21,6
5°	6,8	15°	12,5	25°	22,8
6°	7,3	16°	13,5	26°	24,2
7°	7,8	17°	14,4	27°	25,6
8°	8,2	18°	15,2	28°	27,0
9°	8,7	19°	16,2	29°	28,5
10°	9,3	20°	17,2	30°	30,1

Supongamos ahora que la atmósfera saturada contenga 8 [gr] por [m<sup>3</sup>] y que en la noche la temperatura de las piedras baje por irradiación a 5°, el aire a su alrededor se enfría igualmente y sólo puede contener ahora 6,8 [gr] por [m<sup>3</sup>], el exceso de 8—6,8 = 1,2 [gr] se deposita en forma líquida, o sea como **rocío**.

Si la temperatura baja de 0°, esa agua se congela formando la **escarcha**.

Si el aire contiene vapor de agua hasta cerca de la saturación y baja bruscamente la temperatura a causa de un viento frío, se pro-

duce la condensación del exceso de vapor en forma de pequeñas e innumerables gotitas que oscurecen la atmósfera; si esto sucede sobre la superficie de la tierra se habla de **neblina**, si a cierta altura, de **nubes**. A veces la neblina desaparece en breves momentos dejando la atmósfera completamente despejada; una elevación brusca de la temperatura aumenta la humedad máxima y las gotitas de agua se evaporan nuevamente.

Cuando por el enfriamiento la condensación ha sido tan considerable que las gotitas por su peso no pueden quedar suspendidas en el aire, caen y tenemos **lluvia**.

Los vapores contenidos en la atmósfera ejercen también una presión sobre el barómetro de modo que este aparato en general mide la presión atmosférica más la tensión de los vapores. Suponiendo aire saturado a  $20^{\circ}$ , la presión atmosférica aumentaría en 17,4 [mm], y cuando, por un viento frío, la temperatura baja repentinamente hasta  $10^{\circ}$  la tensión sólo sería 9,1 [mm] de modo que el barómetro tendería que bajar 8,3 [mm]. Este descenso se produce casi siempre antes de que empiece a llover, de modo que el barómetro podría predecirnos hasta cierto grado el mal tiempo.

**La cantidad de agua contenida en realidad en cada [m<sup>3</sup>] de aire atmosférico se llama humedad absoluta.**

Para juzgar las condiciones del tiempo no vale tanto saber esta humedad absoluta como el grado de saturación de la atmósfera. Si comparamos, por ejemplo, aire saturado a  $20^{\circ}$ , con el de  $5^{\circ}$ , el vapor contenido en aquel es 17,2 [gr] mientras que en éste es de 6,8 [gr] y los dos volúmenes están húmedos. Si la primera cantidad de aire contuviera a  $20^{\circ}$  sólo 8,6 [gr] es decir la mitad de la que puede contener, tendríamos que llamarlo aire seco, aunque contenga en valor absoluto más vapor que la segunda cantidad a  $5^{\circ}$ . Vemos que las palabras seco y húmedo son dos ideas relativas, obtenidas por comparación de la cantidad de vapor realmente contenido en el aire con aquella que podría existir a la temperatura reinante. Para expresar el estado de humedad del aire a  $20^{\circ}$  si contiene 8,6 [gr] decimos que el aire contiene la mitad de la cantidad mayor posible, o sea el 50%.

**Este valor que nos indica el tanto por ciento de la humedad máxima a que equivale la humedad absoluta a la misma temperatura se llama humedad relativa.**

Para medir la humedad atmosférica se usan los **higrómetros**.

### Higrómetro químico.

Sirve para determinar la humedad absoluta del aire. Consta de un tubo B en forma de U (fig. 79) que contiene clo-

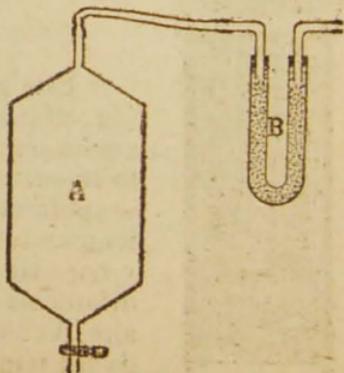


Fig. 79

ruro de calcio y que por una manguera se pone en comunicación con un aspirador, A, recipiente de volumen conocido y que está lleno de agua.

116. Experimento: Pesemos el tubo B y después de haberlo comunicado con el aspirador dejemos salir el agua; volvamos a pesar el tubo y restemos las dos pesadas; observemos la temperatura de la atmósfera.

A medida que el agua sale va siendo reemplazada por aire que pasa por el tubo con cloruro de calcio, substancia que le quita toda su humedad. Si la capacidad del aspirador es de 15 litros y la diferencia de las dos pesadas, por ejemplo, igual a 0,12 [gr] sabemos que

$$15 \text{ [l]} \text{ de aire contienen } 0,12 \text{ [gr] de vapor de agua}$$

$$1 \text{ [l]} \text{ » » » } \frac{0,12}{15} \text{ » » » » »}$$

$$1 \text{ [m}^3\text{]} = 1000 \text{ [l]} \text{ » » » } \frac{1000 \cdot 0,12}{15} = 8 \text{ [gr]}$$

**La humedad absoluta = 8 [gr].**

Para encontrar la humedad máxima, buscamos en la tabla la cantidad de vapor que satura 1 [m<sup>3</sup>] a la temperatura de la atmósfera. Si, por ejemplo, ésta es igual a 20°, la **humedad máxima sería 17,2[ gr].**

Si el aire hubiera contenido 17,2[gr] la hum. relativa 100 %

$$\text{» » » » » } 1 \text{ » » » » } \frac{100}{17,2} \%$$

$$\text{y como contiene } 8 \text{ » » » » } \frac{100}{17,2} 8 = 46,51\%$$

**La humedad relativa = 46,51%.**

El higrómetro químico es muy exacto pero no se presta para las observaciones rápidas que exige la meteorología; por este motivo se emplea en las estaciones meteorológicas exclusivamente el

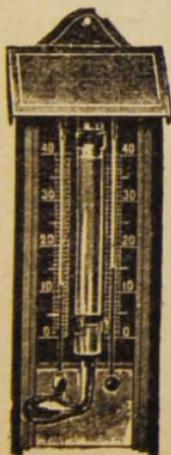


Fig. 80

### Psicrómetro de August.

Este aparato se compone de dos termómetros (fig. 80). La parte inferior de uno de ellos está envuelta en muselina mojada con agua. Si el aparato se encuentra en aire saturado el agua no puede evaporarse y los dos termómetros marcan la misma temperatura. Si el aire está seco, el agua se evapora y por este motivo baja el termómetro mojado. La diferencia es tanto mayor cuanto más seco está el aire. Vemos que se puede apreciar por la diferencia de las temperaturas la humedad de la atmósfera. Como el aparato debe estar expuesto a una corriente

de aire podría evaporarse agua continuamente y el termómetro podría bajar indefinidamente; pero esto no es posible, porque alrededor del termómetro se encuentra aire más caliente y a cierta temperatura este aire le cede tanto calor cuanto pierde por la evaporación. Se establece una diferencia constante de temperatura ( $t-t'$ ). Para encontrar ahora la humedad absoluta se aplica la fórmula empírica

$$f = f' - 0,64 (t - t') \text{ [gr por m}^3\text{]},$$

en que  $f'$  significa la humedad máxima a  $t'$ ° y que nos da la tabla de la pág. 108. Si, por ejemplo, resultan las temperaturas  $t = 8^\circ$  y  $t' = 5^\circ$  buscamos primero en la tabla el valor de  $f'$  que corresponde a  $5^\circ$  y que es igual a 6,8 [gr]. Substituyendo estos valores en la ecuación obtenemos:

$$\begin{aligned} f &= 6,8 - 0,64 (8 - 5) \\ f &= 4,88 \text{ [gr por m}^3\text{]}. \end{aligned}$$

La humedad relativa se encuentra de la misma manera que en el método anterior.

Este aparato no da resultados exactos para temperaturas más bajas que  $0^\circ$ .

#### Preguntas.

- 1) ¿Por qué flota un pedazo de fierro sobre fierro líquido, mientras que un pedazo de plomo se va al fondo en plomo líquido?
- 2) ¿Qué sucede cuando exponemos una botella llena de agua y bien tapada a un gran frío?
- 3) ¿Por qué conviene en el invierno cortar durante la noche el agua potable en la casa y dejar salir el agua que hay en la cafetería?
- 4) ¿Por qué se echa después de las grandes nevadas sal en los rieles de los tranvías?
- 5) ¿En qué caso se evapora más ligero un líquido, si el aire está tranquilo o si sopla viento?
- 6) ¿Por qué sentimos frío cuando salimos del baño?
- 7) ¿Por qué nos resfriamos fácilmente usando trajes húmedos?
- 8) ¿Por qué podemos refrescar bebidas envolviendo las botellas en paños mojados y exponiéndolas al sol y moviéndolas?
- 9) ¿En qué está fundado el uso de los vasos porosos llamados alcarrazas para mantener fresca el agua?
- 10) ¿Por qué se enfría más una cantidad de agua caliente echándole hielo que igual cantidad de agua a  $0^\circ$ ?
- 11) ¿Por qué se funden fácilmente las ollas de estaño, colocándolas sobre el fuego mientras que no se funden cuando contienen agua?
- 12) ¿Por qué soplamos cuando queremos enfriar la sopa?
- 13) ¿Hierve el agua más ligero en una olla abierta o cerrada?
- 14) ¿Por qué se empañan en el invierno los lados interiores de los vidrios y bajo qué condiciones en el verano los lados exteriores?
- 15) ¿Por qué no se evapora una gota de agua que se deja caer sobre un metal calentado hasta el rojo? (Fenómeno de Leidenfrost).
- 16) ¿Por qué podemos pasar una mano mojada por fierro líquido?

#### Ejercicios prácticos.

- 1) Determinar los puntos de fusión y de solidificación de la naftalina, la parafina sólida, el zinc o el plomo.

- 2) Determinar el punto de solidificación de una disolución de sal marina, enfriándola por medio de una mezcla frigorífica.
- 3) Determinar el punto de ebullición del agua, del alcohol y de la anilina.
- 4) Determinar la tensión de los vapores de agua a diferentes temperaturas.
- 5) Determinar el punto de ebullición de una disolución de sal.
- 6) Determinar durante una semana diariamente a cierta hora las humedades absoluta, máxima y relativa por medio del método químico, el psicrómetro, comparar los resultados entre sí y representarlos gráficamente.
- 7) Determinar la altura de un cerro por medio del hipsómetro.

## Calorimetría.

### Cantidad calórica y calor específico.

Por medio del termómetro determinamos el estado calórico del cuerpo o sea su temperatura. De esta idea hay que distinguir bien otra que es la cantidad calórica, cuya definición vamos a dar ahora.

**117. Experimento:** Calentemos sobre un mechero un vaso con un 1 [kg] de agua y anotémos la temperatura que ha alcanzado después de 5 minutos; repitamos el experimento con  $\frac{1}{2}$  [kg] de agua.

La misma fuente calórica produce en tiempos iguales la doble elevación de temperatura en el  $\frac{1}{2}$  [kg] de agua. Si hubiéramos tomado  $\frac{1}{4}$  [kg] de agua habría resultado una elevación de temperatura 4 veces mayor, lo que nos hace ver que el producto de la masa del agua por la elevación de temperatura que experimenta por la misma fuente calórica es constante. Por este motivo podemos considerar este producto como equivalente para la que proviene del mechero y la llamamos **cantidad calórica**. Designándola por  $Q$ , la masa del agua por  $m_a$  y la elevación de temperatura por  $t$ , resulta

$$Q = m_a t,$$

ecuación de la cual podemos deducir la unidad de calor tomando 1 [gr] de agua y la elevación de temperatura de  $1^\circ$  y que se llama **caloría**.

**Caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar  $1^\circ$  la temperatura de 1 [gr] de agua.**

Si queremos calentar 10 [gr] de agua en  $1^\circ$  necesitamos 10 calorías y si queremos elevar la temperatura de los 10 [gr] de  $10^\circ$  a  $30^\circ$ , o sea en  $20^\circ$ , necesitamos  $10 \cdot 20 = 200$  calorías.

Al revés, si queremos bajar la temperatura de 1 [gr] de agua en  $1^\circ$  tenemos que quitarle 1 caloría y si queremos bajar la temperatura de 50 [gr] de agua de  $40^\circ$  a  $20^\circ$  tenemos que quitarle  $50 \cdot 20 = 1\,000$  calorías.

Del experimento 117 resulta que tenemos que proporcionarle a 1 [kg] de agua doble cantidad de calor para obtener la misma elevación de temperatura que a  $\frac{1}{2}$  [kg] de agua.

La cantidad de calor que se necesita para elevar la temperatura de un cuerpo en 1° se llama su capacidad calórica.

La capacidad calórica de 1 [kg] de agua es el doble de la de  $\frac{1}{2}$  [kg].

118. Experimento: Calentemos por un mismo mechero durante 2 [min] 1 [kg] de agua primero y después 1 [kg] de mercurio y anotemos la elevación de temperatura.

Vemos que la temperatura del mercurio sube más, a pesar de haberle proporcionado el mechero la misma cantidad de calor. Reemplazando el mercurio por 1 [kg] de otro cuerpo, líquido o sólido resulta una elevación de temperatura distinta, lo que nos dice que la capacidad calórica no sólo depende de la masa sino también de la naturaleza del cuerpo.

Supongamos que el agua haya subido 5° y el mercurio 150°. El mechero le cedió entonces al agua  $1\ 000 \cdot 5 = 5\ 000$  calorías; esta misma cantidad calórica hizo subir la temperatura de 1 000 [gr] de mercurio en 150°; si para subir la temperatura de 1 000 [gr] de Hg en 150° necesitamos

$$\begin{array}{r} 5\ 000 \\ 1\ 000 \\ \hline 5 \\ 1\ 000,150 \end{array} = 0,033$$

Esta cantidad se llama calor específico.

La cantidad de calor necesaria para elevar 1° la temperatura de 1 [gr] de una substancia, se llama su calor específico.

Damos algunos valores de éste:

Aluminio	0,214	Oro	0,032
Ploino	0,031	Cobre	0,091
Fierro	0,113	Latón	0,093
Platino	0,032	Vidrio	0,19
Hielo	0,505	Mercurio	0,033
Plata	0,056	Alcohol	0,58
Estaño	0,052	Agua	1,0
Zinc	0,092	Toluol	0,4

El calor específico del aluminio es 0,214, lo que quiere decir que necesitamos 0,214 calorías para elevar 1° la temperatura de 1 [gr] de aluminio. Para calentar 20 [gr] en 5° necesitamos entonces  $20 \cdot 0,214 \cdot 5 = 21,4$  calorías.

Designando el calor específico de un cuerpo por  $c$  y su masa por  $m$ , la cantidad de calor necesaria para calentarlo 1°, o sea su capacidad calórica sería

$$K = m \cdot c$$

y para calentarlo en  $t^\circ$  necesitaríamos la cantidad calórica

$$Q = m c t = K t \text{ calorías.}$$

## Determinación del calor específico.

**119. Experimento:** Echemos 800 [gr] de agua a  $90^\circ$  en un vaso que contiene 200 [gr] de agua a  $20^\circ$  y observemos la temperatura de la mezcla; después repitamos el experimento, pero echando 200 [gr] de agua a  $0^\circ$  en el mismo vaso que contiene 800 [gr] de agua a  $90^\circ$ .

La temperatura de las dos mezclas resultaría de  $76^\circ$  si el vaso no influyera en ella. En el primer experimento resulta algo más baja porque el vaso también absorbe calor y en el segundo algo más alta porque el vaso también cede calor, pero, tomando el término medio de los dos valores, resultan  $76^\circ$ .

Los 800 [gr] de agua han cedido  $800 \cdot (90 - 76) = 11\ 200$  calorías y los 200 [gr] han adquirido  $200 (76 - 20) = 11\ 200$  calorías; vemos que el cuerpo caliente cede calor al frío hasta que los dos tengan la misma temperatura y el calor cedido por un cuerpo es igual al calor absorbido por el otro.

Esta relación rige para cualquiera mezcla de cuerpos de distinta temperatura y en ella fundó **Regnault** un método para determinar el calor específico de los cuerpos sólidos y líquidos, llamado

### Método de las mezclas de Regnault.

**120. Experimento:** Pesemos y calentemos algunos pedazos de vidrio (o zinc o latón) hasta el punto de ebullición del agua,  $T$ ; pesemos un vaso y en él una co-

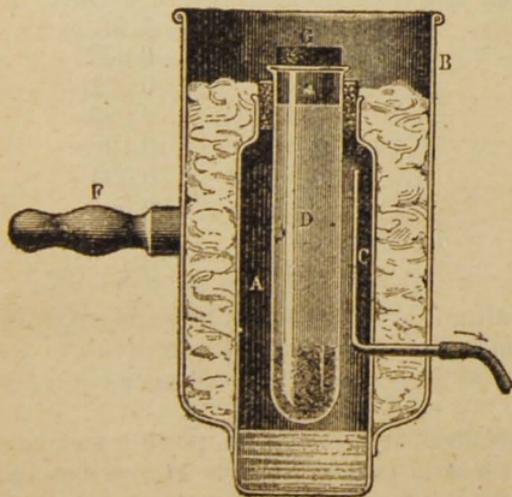


Fig. 81

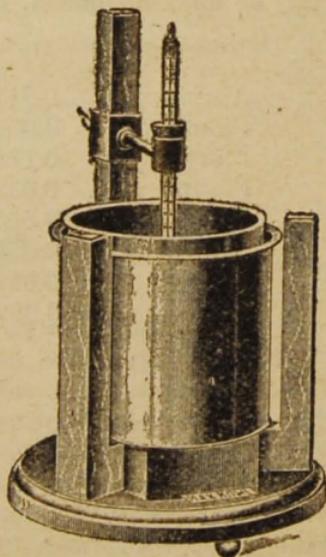


Fig. 82

nocida masa de agua y anotemos su temperatura común,  $t$ ; echemos los pedazos de vidrio al agua y tomemos la temperatura de la mezcla,  $\vartheta$ .

Para calentar el cuerpo se emplea el aparato que se ve en la fig. 81. En el tubo  $D$  se coloca el cuerpo y se le expone por algún tiempo a los vapores de agua hirviente que tiene salida por el tubo  $C$  al exterior. El vaso que contiene el agua se llama **calorímetro** (fig. 82). Consta de dos vasos generalmente de latón, colocado uno dentro del otro y aislados por trocitos de madera y aire, para evitar la pérdida de calor por irradiación.

El vaso interior, cuya masa es  $m_v$  contiene  $m_a$  [gr] de agua a la temperatura  $t$ ; la masa del vidrio es  $m_s$  y su temperatura  $T^\circ$ .

El vidrio cede calor al agua y al calorímetro y después de algunos segundos se establece una temperatura común,  $\vartheta$ . Si designamos además por  $c_v$  el valor específico del vaso y por  $x$  el del vidrio, podemos expresar matemáticamente las cantidades de calor que adquieren y ceden los distintos cuerpos:

I. Cantidad de calor que cede el vidrio enfriándose desde  $T^\circ$  hasta  $\vartheta^\circ$ :

Para enfriar 1 [gr] en	1° cede	$x$	calorías.
» » $m_s$ » »	1° »	$m_s \cdot x$	»
» » $m_s$ » »	$(T - \vartheta)^\circ$ »	$m_s \cdot x \cdot (T - \vartheta)$	»

II. Cantidad de calor que absorbe el agua, calentándose desde  $t$  hasta  $\vartheta^\circ$ .

Para calentar 1 [gr] de agua en 1° hay que proporcionarle 1 caloría.

» » $m_a$ » »	1° »	»	$m_a$ »
» » $m_a$ » »	$(\vartheta - t)^\circ$ »	»	$m_a (\vartheta - t)$ »

III. Cantidad que absorbe el calorímetro, calentándose desde  $t$  hasta  $\vartheta^\circ$ .

Para calentar 1 [gr] del calorímetro en 1° hay que proporcionarle  $c_v$  cal.

» » $m_v$ » »	1° »	»	$m_v \cdot c_v$ »
» » $m_v$ » »	$(\vartheta - t)^\circ$ »	»	$m_v \cdot c_v \cdot (\vartheta - t)$ »

y, aprovechando la relación anterior, resulta la ecuación:

$$m_s (T - \vartheta) \cdot x = m_a (\vartheta - t) + m_v (\vartheta - t) c_v$$

$$x = \frac{m_a (\vartheta - t) + m_v (\vartheta - t) c_v}{m_s (T - \vartheta)}$$

$$x = \frac{(\vartheta - t) (m_a + m_v c_v)}{m_s (T - \vartheta)}$$

**Ejemplo:** Determinar el calor específico del vidrio con los siguientes valores:

$m_v = 94,73$ [gr]	$c_v = 0,093$	
$m_a = 298,0$ »	$T = 98,33^\circ$	$\vartheta = 16,67^\circ$
$m_x = 34,24$ »	$t = 14,9^\circ$	
$x = \frac{(16,67 - 14,9) \cdot (94,73 \cdot 0,093 + 298,0)}{34,24 (98,33 - 16,67)} = \frac{543,05}{2796,04}$		
$x = 0,194.$		

Si queremos determinar el calor específico de cuerpos líquidos podemos emplear el mismo método y sólo hay que reemplazar el

agua por el líquido cuyo calor específico se quiere determinar y mezclarlo con un cuerpo sólido, cuyo calor específico conocemos.

**121. Experimento:** Pesemos y calentemos algunos pedazos de latón hasta el punto de ebullición  $T$  del agua; pesemos el calorímetro y en él una cantidad de alcohol y anotemos su temperatura común,  $t$ ; echemos los pedazos de latón al alcohol y tomemos la temperatura  $\vartheta$  de la mezcla.

Sea  $m_l$  la masa del líquido (alcohol),  $m_c$  la del cuerpo (latón) y  $m_v$  la del calorímetro, el calor específico del cuerpo  $c_c$ , el del calorímetro  $c_v$  y el del líquido  $x$ .

El calor cedido por el cuerpo es igual al calor absorbido por el líquido y el calorímetro:

$$m_c c_c (T - \vartheta) = m_l x (\vartheta - t) + m_v c_v (\vartheta - t)$$

$$x = \frac{m_c c_c (T - \vartheta) - m_v c_v (\vartheta - t)}{m_l (\vartheta - t)}$$

**Ejemplo:** Supongamos que el experimento 121 nos hubiera dado los siguientes valores:

$m_c = 40$ [gr]	$c_c = 0,093$	$T = 98,4^\circ$
$m_l = 200$ »		$t = 15,2^\circ$
$m_v = 94,5$ »	$c_v = 0,093$	$\vartheta = 17,5^\circ$
$x = \frac{40 \cdot 0,093 \cdot (98,4 - 17,5) - 94,5 \cdot 0,093 (17,5 - 15,2)}{200 (17,5 - 15,2)}$		
$x = 0,61.$		

El calor específico de un cuerpo varía mucho cuando pasa del estado sólido al líquido y es siempre mayor cuando está líquido. El calor específico del hielo es 0,505, mientras que el del agua es 1; el del plomo sólido es 0,031 y el del plomo líquido 0,04.

## Determinación del calor de fusión.

**122. Experimento:** Pesemos el calorímetro  $m_v$  y en él una cantidad  $m_a$  de agua y anotemos su temperatura  $t$ ; echemos un pedazo de hielo a  $0^\circ$  (mejor algunos pedacitos de hielo) al agua, tomemos la temperatura  $\vartheta$  de la mezcla y volvamos a pesar el calorímetro para encontrar la cantidad  $m_h$  de hielo.

El proceso es el siguiente: el hielo se funde, es decir, que los  $m_h$  [gr] de hielo a  $0^\circ$  se transforman en agua a  $0^\circ$ ; en seguida esta agua se calienta de  $0^\circ$  a  $\vartheta^\circ$ ; el agua y el calorímetro ceden el calor que se necesitó para ello. Designando el calor de fusión por  $x$  y recordando que es el calor necesario para fundir 1 [gr] de un cuerpo, tenemos:

Calor gastado en fundir el hielo	$m_h \cdot x$	calorías
» » » calentar esta agua de $0$ a $\vartheta^\circ$	$m_h \cdot \vartheta$	»
» cedido por el calorímetro	$m_v c_v (t - \vartheta)$	»
» » agua	$m_a \cdot (t - \vartheta)$	»
Luego: $m_h x + m_h \vartheta = m_v \cdot c_v (t - \vartheta) + m_a (t - \vartheta)$		
	$x = \frac{(m_v c_v + m_a) \cdot (t - \vartheta)}{m_h} - \vartheta.$	

**Ejemplo:** Sea  $m_v = 90$  [gr]       $t = 20^\circ$   
 $m_a = 160$  »       $\vartheta = 14,4^\circ$   
 $m_h = 10$  »       $c_v = 0,093$   
 $x = \frac{(90 \cdot 0,093 + 160) (20 - 14,4)}{10} = 79,9$  calorías.

Este resultado nos dice que necesitamos 80 calorías para transformar 1 [gr] de hielo a  $0^\circ$  en agua a  $0^\circ$ . Para fundir 50 [gr] se necesitan  $50 \cdot 80 = 4\,000$  calorías.

Se han encontrado los siguientes valores para el calor de fusión:

Benzol	30 calorías	Zinc	28 calorías
Naftalina	36 »	Plata	21 »
Agua	80 »	Estaño	13 »
Plomo	6 »	Azufre	9,4 »
Platino	27 »	Fósforo	5 »
Mercurio	2,8 »		

### Determinación del calor de vaporización o condensación.

En la práctica se determina siempre el calor de condensación.

**123. Experimento:** Pesemos el calorímetro  $m_v$  (fig. 83) y en él una cantidad  $m_a$  de agua y anotemos la temperatura común  $t$ ; hagamos hervir agua en un matraz cerrado por cuyo tapón pasa un tubo de vidrio que unimos con el tubo  $b$ , por el cual conducimos el vapor al cilindro hueco  $a$  a; cuando la temperatura del agua ha subido en algunos grados, quitemos el tubo, tomemos bien la temperatura  $\vartheta$  de la mezcla y pesemos nuevamente el calorímetro para encontrar la cantidad  $m_x$  de vapor que se ha condensado.

El proceso es el siguiente: El vapor se convierte en agua de la misma temperatura;  $T$ , en seguida se enfría el agua condensada hasta la temperatura  $\vartheta$  de la mezcla; el calorímetro y el agua que contiene se calientan desde  $t$  hasta  $\vartheta$ .

Designando el calor de condensación por  $x$  y recordando que es el calor que desprende 1 [gr] de vapor al pasar al estado líquido, tenemos:

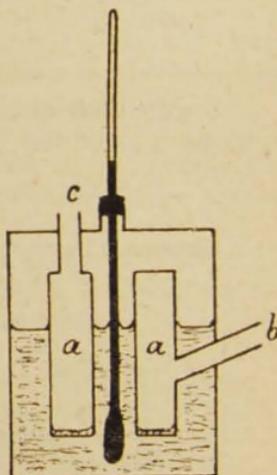


Fig. 83

Calor desprendido durante la condensación	$m_x x$	calorías
» cedido por el agua condensada	$m_x (T - \vartheta)$	»
» absorbido por el calorímetro	$m_v c_v (\vartheta - t)$	»
» absorbido por el agua del calorímetro	$m_a (\vartheta - t)$	»

Luego:

$$m_x x + m_x (T - \vartheta) = m_v c_v (\vartheta - t) + m_a (\vartheta - t)$$

$$x = \frac{(m_v c_v + m_a) (\vartheta - t)}{m_x} - (T - \vartheta)$$

Ejemplo: Sea  $m_v = 213,34$  [gr]       $t = 15,40^\circ$        $s_v = 0,093$   
 $m_a = 270,79$  »       $T = 97,27^\circ$   
 $m_x = 9,49$  »       $\beta = 35,0^\circ$

$$x = \frac{(213,34 \cdot 0,093 + 270,79) \cdot (35,0 - 15,40)}{9,49} - (98,27 - 35) = 537 \text{ calorías.}$$

De esta manera se ha determinado el calor de condensación de muchas sustancias y se ha encontrado a la presión normal (76 [cm]) los siguientes valores:

Agua	536	Anilina	93
Alcohol	208	Benzol	94
Eter	90	Mercurio	62

Estos calores de vaporización o de condensación dependen mucho de la presión exterior y disminuyen con la elevación del punto de ebullición, como lo indica la siguiente tabla, para el agua:

Presión	Punto de ebullición	Calor de vaporización
171 [mm]	63°	562,5 calorías
370 »	81°	547,8 »
760 »	100°	536,0 »
1448 »	119°	523,0 »

Según **Clausius**, podemos obtener el calor de vaporización  $v$  del agua para cualquier punto  $t$  de ebullición por la fórmula

$$v = 607 - 0,708 \cdot t.$$

Ejemplo: El punto de ebullición sea  $t = 90^\circ$ ; entonces es

$$v = 607 - 0,708 \cdot 90$$

$$v = 543,28 \text{ calorías.}$$

### Problemas.

- 1) ¿Cuántas calorías se necesitan para calentar 5 [kg] de agua de  $10^\circ$  a  $80^\circ$ ?
- 2) ¿Cuántas calorías se necesitan para fundir 3 [kg] de hielo a  $0^\circ$ ?
- 3) ¿Cuántos [kg] de hielo podemos fundir con 3 [kg] de agua a  $100^\circ$ ?
- 4) ¿Cuántas calorías se necesitan para transformar 20 [gr] de hielo a  $-5^\circ$  en vapor siendo la presión atmosférica igual a 76 [cm]?
- 5) ¿Cuántos [gr] de vapor a 3 [atm] se necesitan para calentar 50 [kg] de agua de  $15^\circ$  a  $80^\circ$ ?
- 6) ¿Cuántos [gr] de mercurio a  $60^\circ$  hay que echar a un calorímetro de latón que pesa 100 [gr] y que contiene 300 [gr] de agua a  $20^\circ$  para obtener una temperatura de la mezcla de  $22^\circ$ ?
- 7) ¿Qué temperatura final resulta, si echamos 10 [gr] de hielo a  $0^\circ$  a un calorímetro de latón de 50 [gr] y que contiene 200 [gr] de agua a  $20^\circ$ ?
- 8) Para determinar la temperatura de un horno se pone en él una esfera de platino de 150 [gr] y después la echamos a un calorímetro de latón que pesa 100 [gr]

y que contiene 1 [kg] de agua a  $12^{\circ}$  y que sube hasta  $20^{\circ}$ . ¿Cuál es la temperatura del horno?

9) Un calorímetro de latón de 60 [gr] de masa contiene 2 [kg] de agua a  $20^{\circ}$ . ¿Qué resulta al fin, si introducimos en el calorímetro 5 [gr] de vapor a  $100^{\circ}$  y 100 [gr] de hielo a  $-5^{\circ}$ ?

10) En un calorímetro de latón de 150 [gr] de masa que contiene 1 [kg] de alcohol a  $20^{\circ}$  se echan 4 [kg] de hierro a  $50^{\circ}$  y 3 [kg] de zinc a  $80^{\circ}$ . ¿Cuál es la temperatura final?

### Ejercicios prácticos.

1) Determinar el calor específico del hierro, del plomo, del zinc, del mercurio o del toluol.

2) Determinar el calor de solidificación (fusión) del plomo.

3) Determinar el calor de vaporización del alcohol, éter o anilina.

## Fuentes de calor.

Como el calor pasa fácilmente de unos cuerpos a otros hasta que sus temperaturas se hayan compensado, pronto tendrían que desaparecer todas las diferencias de temperatura, si no hubiera **fuentes de calor** que lo produjeran continuamente.

La fuente más importante es el **sol** que emite en cada momento una gran cantidad de calor, de la cual llega una parte a la tierra. El calor del sol es la causa de todos los movimientos que tienen lugar en la superficie de la tierra.

Bajo la influencia del calor solar se desarrollan los vegetales que sirven de alimento al hombre y a los animales, constituyendo de este modo los rayos solares la fuente de nuestra fuerza muscular. Bajo la influencia del calor solar se han formado también los inmensos depósitos de carbón que sirven para producir el calor que pone en marcha las máquinas; es también el que, calentando desigualmente la atmósfera en diferentes puntos, produce los vientos que por su parte llevan del ecuador los vapores de agua hacia las regiones más frías, donde se condensan, produciendo lluvias y dando origen a los ríos. En una palabra, todos los movimientos en la tierra provienen, al fin de cuentas, del calor solar.

**124. Experimento:** Expongamos una cápsula de porcelana con agua y dos cápsulas con arena a medio día durante 1 hora a los rayos solares, de tal manera que éstos lleguen al agua y a una cápsula con arena en dirección perpendicular y a la otra con arena en dirección inclinada y anotemos las temperaturas que han adquirido.

La elevación de temperatura que experimenta el mismo cuerpo por el calor solar depende de su posición con respecto a los rayos, es mayor en la arena expuesta perpendicularmente a los rayos.

Por otra parte, se calienta más la arena que el agua, lo que se debe al gran calor específico y al calor de vaporización de la última.

La arena del desierto de Sahara alcanza una temperatura de 70°, mientras que la del agua del océano de la India sólo sube hasta 30°.

El experimento 124 explica también la temperatura media distinta que posee la tierra en sus diferentes zonas: en la zona tórrida el sol está durante todo el año casi en el zenit, de modo que los rayos solares llegan normalmente a esta parte de la tierra y producen un calentamiento muy grande; las zonas templadas reciben los rayos solares en dirección oblicua y por eso se calientan menos; a las zonas glaciales durante días y semanas no llegan rayos solares y si llegan lo hacen en dirección tan oblicua, que su efecto calórico es insignificante y la temperatura muy baja.

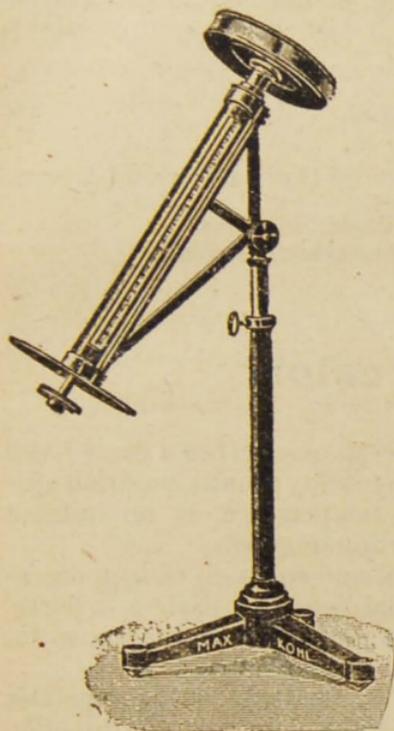


Fig. 84

**Pouillet** fué el primero que determinó la cantidad de calor que recibe la tierra del sol, empleando un calorímetro, llamado **pirheliómetro**. Consta de una caja cilíndrica de plata (fig. 84), cuya cara superior cubierta de hollín se coloca normalmente a los rayos del sol. El resto del aparato es un tubo metálico separado del calorímetro por una substancia aisladora y que protege el termómetro

contra la irradiación directa del sol.

Exponemos el aparato durante  $z$  minutos a los rayos que son absorbidos completamente por el hollín y elevan  $t^\circ$  la temperatura del calorímetro y del agua que contiene. Designando las masas del calorímetro y del agua por  $m_v$  y  $m_a$ , la cantidad de calor recibida en  $z$  [min] por el calorímetro es

$$Q = (m_v c_v + m_a) \cdot t$$

y en 1 [min] recibe  $\frac{Q}{z}$  calorías, y si la superficie del calorímetro es de  $q$  [cm<sup>2</sup>] resulta la cantidad de calor que llega por [min] a cada [cm<sup>2</sup>] del calorímetro de

$$\frac{Q}{z \cdot q} \text{ calorías.}$$

Esta cantidad se llama **la constante solar** y Pouillet la encontró igual a 1,76 calorías.

Por observaciones hechas a grandes alturas se ha encontrado que la atmósfera y sobre todo los vapores de agua contenidos en ella, absorben casi  $\frac{1}{3}$  de todo el calor que llega del sol, de modo que hoy día, tomando en cuenta dichas absorciones, se da como valor probable para la constante solar 3 calorías lo que quiere decir que **cada [cm<sup>2</sup>] perpendicular a los rayos solares recibe 3 calorías por minuto.**

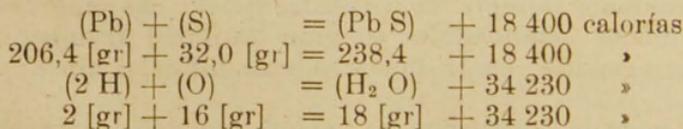
Conociendo este valor es fácil calcular la cantidad de calor que recibe la tierra durante 1 año. Sólo llegan a la tierra aquellos rayos solares que se encuentran en un cilindro que tiene por base una sección central de la tierra. Si el radio de la tierra es de  $R$  [cm], recibe la cantidad

$$Q = 3.24.60\ 365 \cdot R^2 \cdot \pi \text{ calorías.}$$

Esta cantidad sería suficiente para fundir una capa de hielo de un espesor de 53,8 [m].

La segunda fuente del calor es la tierra. La temperatura de las capas superiores depende de la acción del sol; pero ya a una profundidad de 100 [m], el sol no influye en la temperatura, que permanece constante durante todo el año. Partiendo de esta capa, la temperatura va creciendo aproximadamente 1° por cada 30 [m], lo que hace suponer la existencia de un calor central sumamente considerable, a la cual todos los cuerpos tienen que encontrarse en estado líquido o gaseoso. Las aguas termales y los volcanes confirman la existencia del calor central.

Otra fuente muy importante del calor son las **combinaciones químicas**. La combinación química de los cuerpos va, por lo general, acompañada de un desprendimiento de calor. Si se combinan los pesos equivalentes de  $Pb$  y  $S$ , se obtiene  $PbS$  y al mismo tiempo se desarrollan 18400 calorías; para expresarlas, las escribimos del modo siguiente:



La combinación química más importante es la de los cuerpos con el oxígeno, la **combustión**, y la que nos proporciona casi exclusivamente el calor que necesitamos para nuestra vida.

**Se llama calor de combustión la cantidad de calor producida por la combustión de 1 [gr] de una substancia.**

Para determinar este valor se usa un calorímetro especial, llamado **calorímetro de combustión** (fig. 85). En la parte interior se

encuentra un vasito metálico en el que se ponen  $m_s$  [gr] de la substancia cuyo calor de combustión se va a determinar; por la parte inferior está en comunicación con un serpentín. Se inflama primero el cuerpo y se hace pasar el oxígeno necesario para la combustión. La corriente de oxígeno arrastra el calor desprendido y lo pierde en el serpentín, el que se encuentra rodeado de agua a la temperatura ordinaria. Designando el calor producido por la combustión de 1 [gr] de la substancia por  $x$  obtenemos,  $m_s \cdot x$  calorías por la combustión de  $m_s$  [gr], cantidad que es igual al calor absorbido por el agua, el calorímetro y el vaso interior con el

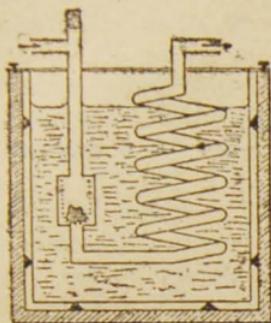


Fig. 85

serpentín, cuyas masas sean  $m_a$ ,  $m_c$  y  $m_e$ . Si la temperatura sube de  $t$  a  $\vartheta$ , tenemos la ecuación:

$$m_s x = m_a (\vartheta - t) + m_c c_c (\vartheta - t) + m_e c_e (\vartheta - t)$$

$$x = \frac{(\vartheta - t) \cdot (m_a + m_c c_c + m_e c_e)}{m_s}$$

$c_c$  y  $c_e$  son los calores específicos del calorímetro y del vaso interior. Por este método se ha obtenido

para carbón de piedra	8 000 calorías
» zinc	1 364 »
» madera seca	3 600 »
» parafina	10 300 »
» alcohol	7 200 »

El calor de combustión del carbón y de la madera varían mucho; se determinan siempre cuidadosamente por las empresas que consumen dichos combustibles en gran cantidad (compañías de vapores, ferrocarriles, etc.); dichos valores influyen mucho en el precio.

Por el calor de combustión se explica también la temperatura de nuestro cuerpo y de los animales. Nuestro cuerpo tiene siempre la temperatura de  $37^\circ$ , aunque a nuestro alrededor haya una temperatura más baja. Este calor proviene de la combustión de los alimentos, que se componen en gran parte de hidrógeno, de nitrógeno y de carbono.

Un hombre de unos 70 [kg] de peso, necesita por día:

117 [gr]	de sustancias albuminosas
120 » »	grasas
263 » »	azúcar
2 627 » »	agua
19 » »	sales y respira
713 » »	oxígeno.

De estas sustancias que pasan por el cuerpo se queman:

87 [gr]	de albúminas
116 » »	grasas
263 » »	azúcar.

Su combustión produce:

1 [gr]	de albúmina	4 300 cal.	resultando un total de	374 100 calorías
1 » »	grasa	9 000 »	» » » »	1 044 000 »
1 » »	azúcar	4 000 »	» » » »	1 052 000 »
				2 470 100 calorías

Esta combustión produce en el cuerpo humano la temperatura normal de 37°. En épocas frías la irradiación tiende a producir un descenso de temperatura y, para evitarlo, se abriga el cuerpo cubriéndolo con sustancias que conducen mal el calor y se necesita mayor alimentación para aumentar el calor de combustión.

### Problemas.

- 1) ¿Qué cantidad de calor obtenemos por la combustión de 10 [kg] de carbón, cuyo calor de combustión es de 8 000 calorías?
- 2) Una tonelada de carbón de piedra, cuyo calor de combustión es de 7 500 calorías cuesta \$ 24, ¿cuánto debería costar una tonelada de madera cuyo calor de combustión es de 3 000 calorías?
- 3) Con 1 [kg] de carbón se pueden evaporar 6 [kg] de agua a 0°. ¿Qué cantidad de calor se pierde si el calor de combustión del carbón es de 7 500 calorías?
- 4) ¿Cuál sería el trabajo obtenido por la combustión de 1 [kg] de gas de alumbrado, si pudiéramos aprovechar completamente su calor de combustión de 6 000 calorías?
- 5) ¿Cuántos kg de carbón se necesitan para convertir 5 [kg] de hielo a 0° en vapor a 100°, siendo el calor de combustión de 8 000 calorías y suponiendo una pérdida de calor de 20%?
- 6) Si una máquina a vapor gasta 2 [kg] de carbón por [seg] y por caballo de potencia, ¿cuánto por ciento de energía acumulada en el carbón se transforma en trabajo por la máquina, siendo el calor de combustión igual a 8 000 calorías?

### Ejercicios prácticos.

- 1) Determinar por medio del pirheliómetro la cantidad de calor que llega del sol en 1 [min].
- 2) Determinar el calor de combustión del carbón de piedra, de madera, aceite y parafina.

## Teoría termodinámica.

Después de estudiar los fenómenos producidos por el calor, debemos preguntarnos en qué consiste el calor. Los antiguos suponían que existía un fluido invisible e imponderable, llamado **calórico**, y, según que un cuerpo estuviera más o menos cargado de él, decían que el cuerpo estaba caliente o frío.

Al poner en contacto dos cuerpos de distinta temperatura se suponía que el fluido calórico pasaba del cuerpo caliente al frío hasta que se igualaban sus temperaturas.

Se pudo explicar por esta teoría casi todos los fenómenos calóricos, pero falló en la explicación de los fenómenos de la irradiación calórica y, sobre todo, a causa de que podemos producir calor por frotamiento o en general por trabajo mecánico y que los dos cuerpos que se frotan se calientan simultáneamente. La teoría del fluido sólo admite que un cuerpo en contacto con otro pueda calentarse a costa del otro que se enfría. ¿De dónde ha salido el fluido calórico que calienta los dos cuerpos al mismo tiempo?

Por este motivo ha sido necesario reemplazar la teoría del fluido por otra llamada **teoría termodinámica** que hoy día está aceptada universalmente.

Según ella tenemos que suponer que el calor consiste en el movimiento de las moléculas. A la temperatura de  $-273^{\circ}$  (cero absoluto) las moléculas de un cuerpo están en reposo y por este motivo el cuerpo está absolutamente frío. Si por una fuerza exterior, por ej. por un golpe, se alejan algunas moléculas de su posición de equilibrio, efectúan oscilaciones alrededor de su posición inicial chocando contra las moléculas vecinas y poniéndolas también en oscilación. Si tocamos un cuerpo caliente, sus moléculas superficiales que oscilan con gran velocidad chocan con las moléculas más lentas de la mano, aceleran su movimiento y tenemos la sensación de calor. Al revés, al tocar un cuerpo frío, las moléculas de nuestra mano disminuyen su velocidad y recibimos la sensación de frío.

Vemos que la teoría termodinámica reduce los fenómenos calóricos a movimientos mecánicos y por eso debe haber una relación íntima entre ellos y será posible medir una cantidad de calor por cierta cantidad mecánica.

Para encontrarla levantemos 5 [kg] de plomo a la altura de 1 [m] y dejémoslos caer sobre otro pedazo de plomo de masa conocida que está en el suelo y térmicamente aislado.

Los 5 [kg] a la altura de 1 [m] poseen la energía potencial de 5 [mkg]. Al caer y antes que se efectúe el choque, esta energía potencial se ha convertido en energía cinética  $\frac{1}{2} m v^2 = 5$  [mkg]. Si el plomo fuera un cuerpo perfectamente elástico, después del choque rebotaría con la misma velocidad  $v$  y llegaría otra vez a la altura de

1 [m] transformándose sucesivamente la energía cinética en potencial y viceversa.

Pero el plomo no rebota sino que se aplasta, desapareciendo en el acto toda la energía cinética. ¿Qué se ha hecho la energía cinética? La teoría termodinámica contesta a esta pregunta diciendo que se ha gastado completamente en aumentar la velocidad de las moléculas de los dos cuerpos y por este motivo ha aumentado la cantidad calórica de ellos y subido su temperatura.

Se ha gastado la energía cinética de los 5 [kg] de plomo, que en adelante vamos a llamar la **energía cinética mecánica**, y se ha transformado en energía cinética de las moléculas de los cuerpos que en adelante llamaremos **energía calórica**.

Dejando caer los 5 [kg] de una altura de 2 [m] resulta la doble cantidad de energía cinética mecánica, se duplica la energía calórica y se obtiene la doble cantidad de calor. Vemos que la teoría considera **el calor como una forma de energía** que resulta de las otras y mide las cantidades de calor que resultan por la pérdida de la energía cinética de los 5 [kg] de plomo y por el aumento que experimenta la energía calórica de los dos cuerpos entre los cuales se produjo el choque. Suponiéndolos al principio a la temperatura de  $-273^{\circ}$ , es decir a  $0^{\circ}$  de la escala absoluta, la única cantidad de calor que poseerían después del choque se mediría por la suma de las energías calóricas, de modo que podemos decir:

**La cantidad de calor acumulada en un cuerpo es igual a la suma de la energía cinética de sus moléculas, llamada energía calórica.**

Conociendo esta relación, vamos a ver cómo la teoría termodinámica explica los distintos fenómenos calóricos que hemos estudiado en los capítulos anteriores.

Si acercamos una llama a un cuerpo, sus moléculas adquieren una velocidad mayor a causa de los choques que reciben de las partículas de la llama, dotadas de una velocidad muy grande. Por este aumento de la velocidad, se hace mayor la energía cinética, lo que equivale a una elevación de temperatura. Los choques que recibe nuestro dedo por las moléculas del cuerpo en oscilación, son los que sentimos nosotros como calor y cuyo grado es mayor o menor según la energía cinética que posean las moléculas.

Como con la elevación de temperatura las moléculas necesitan mayor espacio para sus movimientos, se desalojan unas a otras y el cuerpo ocupa un volumen mayor; es decir, se dilata. Si continúa el calentamiento de un cuerpo sólido, la cohesión entre las moléculas se hace cada vez más débil, las moléculas se alejan y salen al fin de la esfera de actividad molecular, de modo que la cohesión ya no es capaz de hacerlas volver a su posición de equilibrio. Las moléculas abandonan entonces su posición anterior y aceptan un movimiento translativo, resbalando unas al lado de las otras, sin poder separarse completamente, por una pequeña fuerza de atracción mutua que todavía existe: el cuerpo pasa al estado líquido. Si se alcanza el punto

de fusión, el calor que se le da no se aprovecha para aumentar la energía cinética de las moléculas, sino para vencer la fuerza de cohesión que impide la separación de ellas y por este motivo no sube la temperatura. El calor gastado para vencer la cohesión es el calor de fusión.

Las partículas que forman la superficie de un líquido pueden pasar, aumentando su velocidad, por el límite de la esfera de actividad molecular y volar al espacio. Estas moléculas en estado libre forman el vapor. La separación de las moléculas representa la evaporación y tiene lugar a cualquiera temperatura; pero como la velocidad a una temperatura elevada es mucho mayor que a una temperatura baja, es claro que en el primer caso la posibilidad de la separación de las moléculas, es mucho mayor, lo que equivale a decir que a una temperatura elevada un líquido se evapora más ligero.

Como en la evaporación, se escapan cada vez más moléculas, tiene que disminuir la energía cinética total del cuerpo, por este motivo baja la temperatura, lo que explica el frío de evaporación.

### Transformación del trabajo contra el roce en calor.

Si actuamos con la fuerza  $F$  sobre una masa que se mueve sobre una base, debería adquirir un movimiento uniformemente acelerado y después de haber recorrido el espacio  $s$ , tendría cierta energía cinética,  $\frac{1}{2} m v^2$ , que debería ser igual al trabajo efectuado,  $F s$ ; pero, si la fuerza cesa de actuar, el cuerpo queda en reposo, no ha

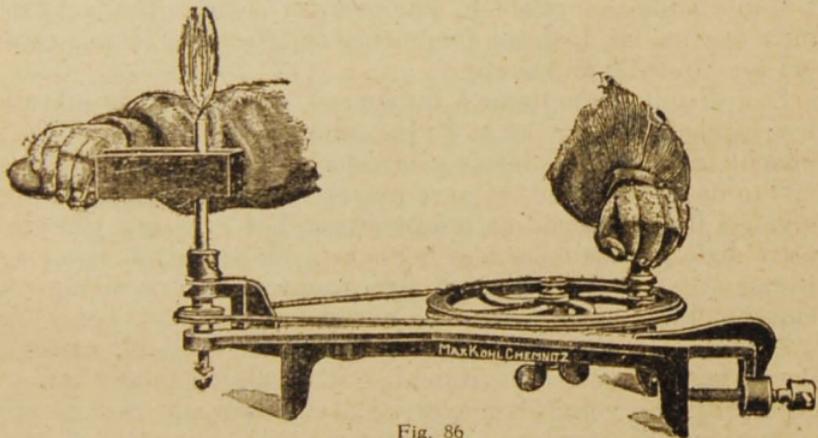


Fig. 86

adquirido energía cinética. ¿Cuál es entonces el equivalente para el trabajo efectuado? La teoría termodinámica dice que el **trabajo en vez de convertirse en energía cinética mecánica se ha transformado en energía calórica.**

Al resbalar un cuerpo sobre otro, las partículas en contacto chocan unas con otras, aumentando sus velocidades y con esto la ener-

gía calórica de los dos cuerpos, por lo que sube la temperatura de ambos.

Para demostrar que se produce calor al frotar un cuerpo con otro, vamos a hacer el

**125. Experimento:** Hagamos girar rápidamente con la máquina centrífuga un tubo tapado de metal que contiene éter, oprimiéndolo con una pinza de madera forrada con corcho interiormente (fig. 86).

El trabajo que efectuamos contra el roce haciendo girar la máquina produce tanto calor que el éter entra en ebullición y la tensión de sus vapores hace saltar el tapón.

Hay muchos otros ejemplos que comprueban la producción de calor por rozamiento. Si se lima un trozo de metal, si se barrena un palo, si se taladra una pieza de metal, las herramientas se calientan considerablemente; si se dobla repetidas veces un alambre para quebrarlo, se calienta mucho la parte que sufre la flexión. Para encender los fósforos se les frota contra la lija de la caja. Los salvajes hacen fuego aprovechando el calor producido por el frotamiento de un palo cilíndrico que hacen girar rápidamente en la cavidad de un palo en cuyo agujero colocan una substancia fácilmente inflamable.

### El equivalente mecánico del calor.

Después de haber visto que cada vez que desaparece movimiento, sea por choques, sea por roce, desapareciendo energía cinética o trabajo, estos últimos se transforman en energía calórica, podemos buscar la relación numérica que existe entre ellos; es decir, la cantidad de energía ne-

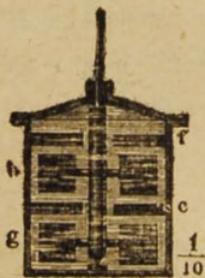


Fig. 87

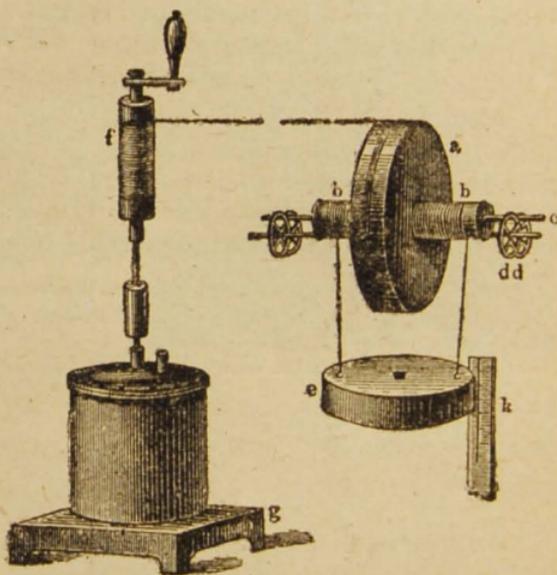


Fig. 87 a

cesaria para producir 1 caloría y que se llama **equivalente mecánico del calor**.

**Equivalente mecánico del calor es el número de unidades de trabajo o de energía mecánica necesario para producir una caloría.**

El primero que encontró este valor fué el médico alemán **J. R. Meyer**, pero sólo por consideraciones teóricas, mientras que **Joule** fué el primero que transformó trabajo directamente en calor, midiendo ambas cantidades.

Empleo un calorímetro lleno de agua dentro del cual gira un eje con paletas (fig. 87), que tiene en su prolongación un cilindro  $f$  (fig. 87 a) al cual se arrolla una cuerda que, por medio de una rueda con árbol  $acb$ , sostiene un cuerpo  $e$ ; el peso  $P$  de este cuerpo se mide en [kg-peso], y al bajar hace girar las paletas y éstas por el roce con el agua producen calor que eleva de  $t^\circ$  a  $\vartheta^\circ$  la temperatura de las masas  $m_a$  del agua,  $m_v$  del calorímetro y  $m_p$  del eje con las paletas.

Cuando ha bajado  $h$  [m], el peso  $P$  ha efectuado el trabajo

$$T = P \cdot h \text{ [mkg]}^*$$

y este trabajo desarrolla en el calorímetro el calor

$$Q = m_a (\vartheta - t) + m_v c_v (\vartheta - t) + m_p c_p (\vartheta - t)$$

siendo  $c_v$  y  $c_p$  los calores específicos del calorímetro y del eje con las paletas; luego 1 caloría requiere

$$E = \frac{P \cdot h}{(m_a + m_v c_v + m_p c_p) (\vartheta - t)} \text{ [mkg]},$$

siendo  $E$  el equivalente mecánico del calor. Joule encontró  $E = 0,424$  [mkg], pero el término medio de muchas determinaciones por diversos procedimientos ha dado el valor

$$E = 0,427 \text{ [mkg]}.$$

Este resultado nos dice que es posible convertir el trabajo mecánico (o energía cinética mecánica) en calor, según una equivalencia bien definida y esta verdad se ha expresado en la siguiente forma:

**El trabajo mecánico puede convertirse totalmente en calor, de tal modo que cada 0,427 [mkg] producen 1 caloría.**

**Problema:** Un pedazo de plomo de 3 [kg] cae de la altura de 5 [m] sobre otro pedazo de plomo térmicamente aislado de 2 [kg]. ¿Cuál es la elevación de temperatura que experimentan por el choque?

La energía disponible es igual a  $3 \cdot 5 = 15$  [mkg]. Por 0,427 [mkg] obtenemos 1 caloría, por 15 [mkg]  $\frac{15}{0,427} = 35,1$  calorías. Para calentar  $(3 + 2)$  [kg] de plomo  $1^\circ$  se necesitan  $5000 \cdot 0,031 = 155$  calorías y por las 35,1 calorías sube la temperatura  $\frac{35,1}{155} = 0,23^\circ$ .

\* **Observación:** No todo el trabajo  $P \cdot h$  se transforma en calor sino una parte se convierte en energía cinética igual a  $\frac{1}{2} \frac{P}{g} v^2$ , de modo que la ecuación exacta sería

$$E = \frac{P \cdot h - \frac{1}{2} \frac{P}{g} v^2}{(m_a + m_v \cdot c_v + m_p c_p) (\vartheta - t)} \text{ [mkg]}.$$

## Transformación del calor en trabajo.

El calor al dilatar los cuerpos los pone en condiciones de vencer resistencias y producir efectos mecánicos. Para transformar la energía calórica en trabajo bastaría comunicarle aquella a un cuerpo convenientemente elegido y utilizar los fenómenos mecánicos que se producen por efecto de la variación de volumen y de presión. Pero no todos los cuerpos sirven igualmente como intermediarios en la transformación.

Los sólidos y los líquidos experimentan dilataciones tan pequeñas que poco se prestarían para efectuar un trabajo. Los gases, en cambio, se prestan muy bien, pero más aún aquellos cuerpos que, por la acción del calor, pasan del estado líquido al gaseoso y viceversa.

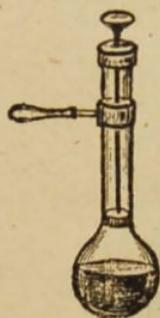


Fig. 88

**126. Experimento:** Hagamos hervir agua en la esfera A (fig. 88) que está provista de un tubo cilíndrico dentro del cual se mueve un émbolo; después enfriemos el agua echando la esfera al agua fría.

El agua recibe calor de la llama, se evapora y por la tensión de sus vapores sube el émbolo; después el vapor, cediendo calor al agua fría, se condensa y el émbolo baja.

En las máquinas industriales se requiere un funcionamiento continuo y por este motivo es necesario que el cuerpo intermediario pueda encontrarse alternativamente en contacto con la fuente de calor y con el órgano destinado a recoger la energía mecánica. El ejemplo más importante de estas transformaciones es la

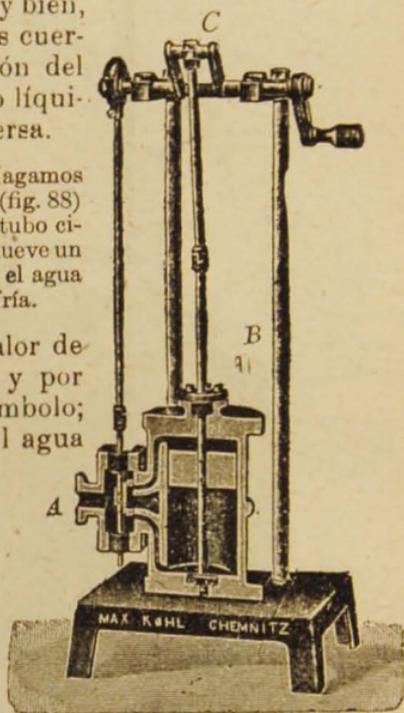


Fig. 89

### Máquina a vapor.

En ella distinguimos dos partes esenciales: el **generador de vapor** o caldera y el **utilizador del vapor** o cilindro. En la caldera se produce vapor a alta tensión y temperatura que pasa por el tubo A (fig 89) a la **caja de vapor** que está al lado del cilindro y en comunicación con él por dos **tubos de admisión**. Otro cajón más chico,

**cajón de distribución**, puede moverse de abajo hacia arriba. En la posición de la fig. 89 el vapor contenido en la caja de vapor llega por el tubo inferior al cilindro y, ejerciendo presión sobre la cara inferior del émbolo, lo obliga a subir. Si el émbolo está arriba, el cajón de distribución se ha movido hacia abajo, cerrando el tubo inferior y abriendo el superior; el vapor entra entonces por arriba, hace bajar el émbolo y el vapor que se encontraba debajo sale, pasando por el cajón de distribución, a la atmósfera o a un **condensador** donde, después de recorrer tubos bañados por agua fría, se condensa produciéndose un espacio enrarecido.

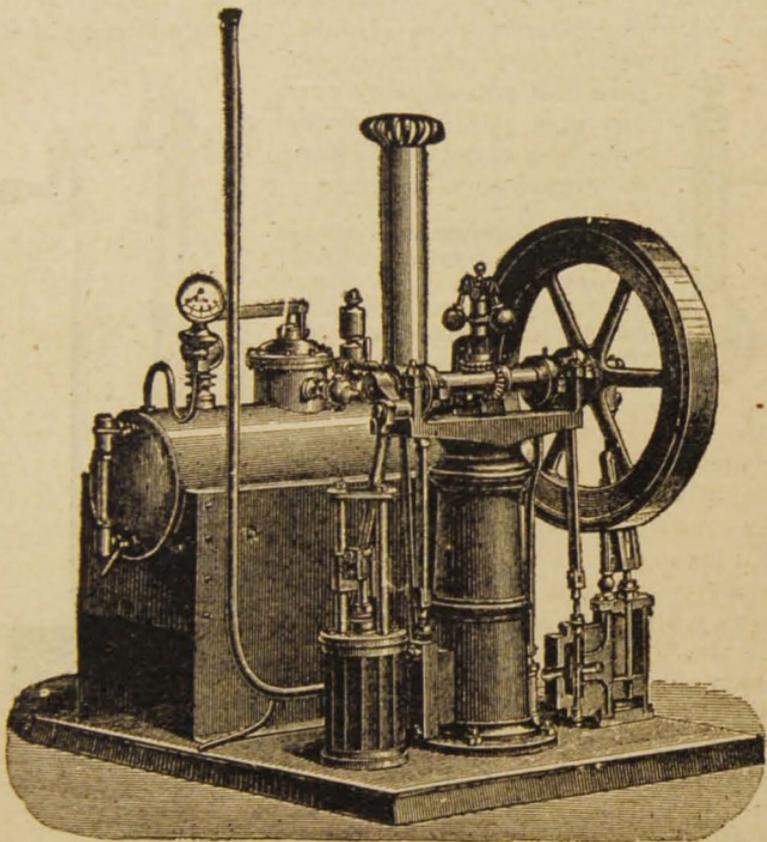


Fig. 90

El émbolo del cilindro adquiere un movimiento rectilíneo de vaivén que se transmite por medio del vástago *B* a la biela *C* (fig. 89). Esta pone al eje principal de la máquina, llamado **árbol** (fig. 89), en rotación, transformándose así el movimiento rectilíneo del émbolo en movimiento rotatorio. En el árbol se encuentra también una gran rueda, llamada **volante**, que tiene por objeto hacer más unifor-

me la marcha de la máquina y suprimir los **puntos muertos**, a saber: que, llegado a los puntos más altos y más bajo, el émbolo no podría moverse por la resistencia del eje, la biela se coloca en línea recta con el vástago y perpendicular al eje, de modo que desaparece el momento estático para girar el eje. El volante evita este inconveniente, devolviendo en el instante preciso de los puntos muertos, una parte de la energía acumulada en su enorme masa, durante el período de actividad del émbolo. Para dar al cajón el movimiento de vaivén que regulariza la distribución del vapor, se emplea la **excén-**

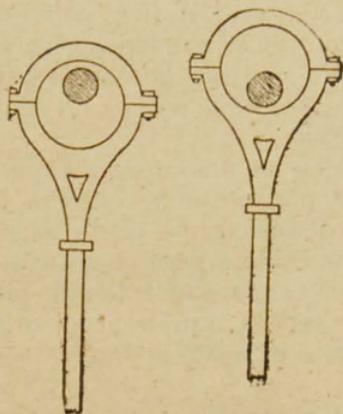


Fig. 91

**trica** (fig. 91). Se compone de un disco circular que no está fijo en su centro con el eje principal, sino excéntricamente. Alrededor de este disco se encuentra un anillo en el

que puede moverse libremente el disco. En la posición indicada en la fig. 91, I el cajón ha llegado al punto más bajo; al girar el eje, éste permanece fijo, y el disco va a ocupar la posición que se ve en la fig. 91, II, levantando el anillo y con éste el cajón.

Para regularizar la entrada del vapor a la caja de distribución, se emplea el **regularizador de fuerza centrífuga** (véase tomo I). Si entra demasiado vapor, el movimiento de la máquina se acelera y para mantener constante la velocidad se transmite la rotación del árbol a un eje vertical *AB*, que lleva dos brazos que terminan en su parte inferior en una bola metálica cada uno. Los puntos *G* y *H* (fig. 92) están en comunicación por medio de varillas con una esfera *C* que puede moverse libremente de arriba hacia abajo. En el estado de reposo, las bolas metálicas tienden a colocar verticalmente los dos brazos, mientras que, cuando el eje está en rotación, tienden a alejarlos, por efectos de la fuerza centrífuga, separándose tanto más cuanto más rápido es el movimiento; por esta separación levantan la esfera *C* y su movimiento se transmite a un disco que cierra más

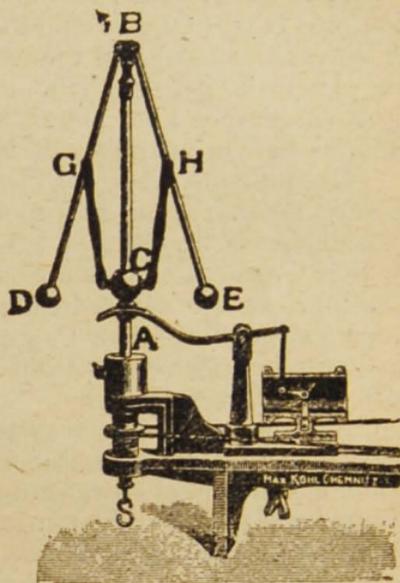


Fig. 92

o menos la entrada del vapor. Este disco se llama **válvula de chapaleta**.

En la máquina que se acaba de describir, una parte del cilindro está siempre en comunicación con la atmósfera, de tal manera que sobre esta cara actúa la presión atmosférica. Es claro, que en estos casos necesitamos una tensión del vapor mayor que una atmósfera, para poder poner en movimiento el cilindro, y por este motivo, tales máquinas se llaman **máquinas de alta presión**. Las locomotoras son máquinas de esta clase.

Si se quiere poner en movimiento una máquina con una tensión más baja, hay que eliminar la presión atmosférica, dejando salir los vapores usados al **condensador**, donde se condensan los vapores, por medio del agua fría. Por medio de una bomba se lleva el agua condensada a la caldera. Las máquinas que poseen tal condensador se llaman **máquinas de baja presión**.

Resumiendo podemos decir que en las máquinas a vapor, las bombas aspiran agua caliente de un depósito que la contiene (condensador) y la inyectan en la caldera, donde recibe cierta cantidad  $Q_1$  de calor por la cual se evapora; de la caldera pasa sucesivamente al cilindro en que se produce trabajo; al condensador donde pierde cierta cantidad de calor  $Q_2$  y pasa al estado líquido y por último, mediante la acción de la bomba vuelve a la caldera donde recobra su temperatura y presión.

Vemos que el agua recorre un ciclo cerrado y que la máquina sólo puede efectuar trabajo cuando está provista de una fuente del calor (caldera) para elevar la temperatura de la substancia intermedia (agua) a  $T_1^\circ$  y de una fuente de agua fría (condensador) para bajar la temperatura de la misma substancia a  $T_2^\circ$  y que siempre el calor pasa de un cuerpo caliente a otro frío.

Obtenemos el siguiente resultado que fué formulado primero por **Sadi Carnot**.

**El calor puede efectuar trabajo mecánico, sólo cuando pasa de un cuerpo caliente a otro frío.**

Carnot comparó, por este motivo, el calor con el agua, que no puede efectuar trabajo, sino pasando de un nivel a otro más bajo; pero suponía que, como el agua, no se pierde calor al pasar al cuerpo frío.

Examinando más detalladamente los dos casos vemos que el agua pierde energía potencial, al caer a un nivel más bajo, la que se convierte en trabajo y como el calor consiste en energía cinética de las moléculas, tiene que desaparecer una cantidad de ella que se transforma en trabajo mecánico, y **Clausius** demostró que tiene que desaparecer exactamente la cantidad de calor que corresponde al trabajo obtenido, es decir, para 1 [mkg] de trabajo tiene que gastar-

se  $\frac{1}{0,427} = 2,34$  calorías (**equivalente térmico del trabajo**) y que sólo

la cantidad sobrante del calor pasa al cuerpo frío. De esto resulta que no es posible convertir en trabajo todo el calor disponible.

Siendo  $Q_1$ , el calor suministrado al cuerpo intermediario en la caldera y  $Q_2$  la cantidad de calor cedido al condensador,  $Q_1 - Q_2$  representa la cantidad de calor convertida en trabajo.

Clausius dedujo, de la imposibilidad de convertir calor en trabajo sin que pasara una parte del calor a un cuerpo frío, una consecuencia muy interesante para el fin del mundo. Examinando las distintas formas de energía que existen en el mundo las separó en dos grupos: el primero abarca todas aquellas energías que aún pueden convertirse en trabajo, como ser las energías mecánica, química, eléctrica y calórica a **alta** temperatura y el segundo aquellas que ya no pueden convertirse en trabajo como la energía calórica a baja temperatura. Como ninguna de las energías del primer grupo puede transformarse en trabajo sin que una parte se transforme en calor que se distribuye en todos sentidos y compensa las diferencias de temperatura, con el tiempo toda la energía del universo debe encontrarse en forma de calor a una baja temperatura uniforme. Una vez alcanzada esta compensación de temperatura ya no podría producirse trabajo; todos los movimientos cesarían, y el proceso del mundo habría terminado.

### Rendimiento de la máquina a vapor.

Se entiende por **rendimiento térmico** de una máquina a vapor la razón entre la cantidad de calor convertida en trabajo y la cantidad total de calor suministrada por la caldera:

$$\text{Rend. térmico} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

El valor del rendimiento térmico es distinto según la manera como se proporciona el calor a la máquina, lo que mostraremos más adelante en algunos ejemplos (véase pág. 134-136). Puede alcanzar según Carnot-Clausius el máximo igual a

según Carnot-Clausius el máximo igual a  $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ .

$$(29) \quad \text{Rend. térm. máximo} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Para este caso especial, rige la ecuación

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

y, designando la cantidad de calor convertido en trabajo por  $Q$ , resulta:

$$(30) \quad Q = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot Q_1.$$

**Problema:** La temperatura de la caldera sea  $t_1 = 152,2^\circ$  [ $T_1 = 273 + 152,2$ ] y la del condensador sea  $t_2 = 40^\circ$  [ $T_2 = 273 + 40$ ]; la cantidad de calor suministrada

a la máquina sea  $Q_1$ . ¿Cuál es el rendimiento térmico más favorable y qué cantidad de  $Q_1$  se transforma en trabajo?

$$\text{Rend. térm. máx.} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{(273 + 152,2) - (273 + 40)}{273 + 152,2} = 0,26.$$

$$\text{El calor transformado en trabajo es } Q = \frac{T_1 - T_2}{T_1} Q_1 = 0,26 \cdot Q_1.$$

Aunque fuera posible realizar prácticamente el método de Carnot para obtener el máximo de rendimiento, nunca podríamos aprovechar todo el trabajo calculado puesto que una parte de él se gasta en vencer el roce que hay entre los distintos elementos de la máquina, y por la experiencia se sabe que ésta equivale al 35%, de modo que sólo resta el 65% de la cantidad  $0,26 Q_1$  y que equivale a  $0,17 Q_1$ . Este trabajo se llama el **trabajo útil** y está a nuestra disposición en la polea de transmisión de la máquina.

Este resultado es más desfavorable todavía si no partimos, como en el caso anterior, del calor proporcionado al cuerpo intermediario en la máquina, sino de la cantidad de calor producido por la combustión del combustible. De ésta perdemos un 20% que se escapa con los gases por la chimenea, en seguida se pierden 1,4% en los tubos que conducen el calor al cilindro, de modo que sólo llega a éste el 78,6% que corresponde a  $Q_1$  en el ejemplo anterior. De esta cantidad se convierte en trabajo

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot Q_1 = \frac{(273 + 152,2) - (273 + 40)}{273 + 40} \cdot 78,6 = 20,4\%$$

de modo que  $78,6 - 20,4 = 58,2\%$  pasan al condensador, y teniendo presente que el roce consume todavía 35% de los 20,4%, obtenemos el trabajo útil de **13,3%**.

Se llama **rendimiento económico** de la máquina la razón entre el trabajo útil proporcionado por la máquina durante 1 [h] y el calor gastado en el mismo tiempo:

$$\text{Rendimiento económico} = \frac{\text{trabajo útil por hora}}{\text{calor gastado por hora}}.$$

Prácticamente se determina el trabajo útil por medio del freno de Prony (véase Mecánica, tomo I) y el denominador se obtiene multiplicando la cantidad de combustible gastado por hora por su calor de combustión.

### Potencia de una máquina a vapor.

Ahora vamos a calcular la potencia de una máquina a vapor. Sea  $p$  la tensión útil del vapor en atmósferas;  $q$ , la sección del pistón en [cm<sup>2</sup>], y  $l$  en [m], la carrera del pistón.

La presión con que actúa el vapor sobre el émbolo es:

$$p \text{ [atm]} = p \cdot 1,033 \left[ \frac{\text{kg-peso}}{\text{cm}^2} \right]$$

de modo que la fuerza total es  $p \cdot q \cdot 1,033$  [kg-peso]

y el trabajo por vuelta  $T = p \cdot q \cdot 1,033 \cdot 2 l$  [mkg]

puesto que a una vuelta corresponde el movimiento de ida y vuelta del émbolo, es decir, un camino igual a  $2 l$  [m].

Si la biela da  $n$  vueltas por segundo,

$$\text{la potencia} = p \cdot q \cdot 1,033 \cdot 2 l \cdot n \left[ \frac{\text{mkg}}{\text{seg}} \right]$$

$$\text{potencia} = \frac{p \cdot q \cdot 1,033 \cdot 2 l \cdot n}{75} \text{ [HP].}$$

### Máquina de expansión.

En los cálculos anteriores hemos supuesto que el vapor entra por el tubo de admisión al cilindro hasta que el émbolo haya llegado al término de su carrera. En tal caso el émbolo adquiere un movimiento uniformemente acelerado y choca, al llegar al otro extremo, con mucha energía contra el árbol, y la máquina se gastaría muy pronto.

Para evitar estos inconvenientes se cierra la entrada del vapor más temprano y se deja expandir el vapor y disminuir su tensión hasta que, al llegar el émbolo al otro extremo de su carrera, sea igual a la que actúa sobre la otra cara del émbolo. Tal máquina se llama **máquina de expansión**.

**Ejemplo:** La máquina trabaja con vapor a 12 [atm] y la entrada del vapor se cierra cuando el émbolo ha recorrido  $\frac{1}{12}$  de su camino.

En el primer  $\frac{1}{12}$  del camino la tensión del vapor es de 12 [atm], al comenzar el segundo  $\frac{1}{12}$  también 12 [atm], pero al final del mismo, según la ley de Mariotte, sólo 6 [atm] y la tensión media en el segundo  $\frac{1}{12}$  del camino igual a  $\frac{12+6}{2} = 9$  [atm].

De la misma manera se encuentran las tensiones medias para los otros 12 avos del camino del émbolo iguales a 3,5; 2,7; 2,2; 1,855; 1,605; 1,415; 1,225; 1,145; 1,045 [atm] y la tensión media durante todo el camino igual a 3,56 [atm]. (En la práctica se encuentra esta tensión media gráficamente por un aparato llamado indicador). Cuando se trata de una máquina de alta tensión actúa sobre la otra cara 1 [atm] de modo que se aprovechan para el movimiento del émbolo 2,56 [atm], útiles, y la potencia sería, según la fórmula del capítulo anterior,  $\frac{2,56 \cdot q \cdot 1,033 \cdot 2 n l}{75}$  [HP] en vez de

$\frac{11 \cdot q \cdot 1,033 \cdot 2 n l}{75}$  [HP] en la máquina sin expansión; su potencia baja a la cuarta parte.

Pero la máquina de expansión de nuestro ejemplo sólo gasta  $\frac{1}{12}$  del vapor de la máquina ordinaria de iguales dimensiones y por esto  $\frac{1}{12}$  del carbón, de modo que 1 [HP] de la máquina de expansión cuesta  $\frac{1}{12}$  del de la máquina ordinaria.

En una máquina de expansión se aprovecha mejor el calor que en una máquina sin expansión.

**Problema:** En las grandes máquinas a vapor se gastan 0,5 [kg] de carbón para obtener el trabajo útil de 1 [HP] por hora, siendo el calor de combustión del carbón de 7500 calorías. ¿Cuál es el rendimiento económico?

$$\text{Rend. económico} = \frac{1 \text{ [HP por hora]}}{500 \cdot 7500 \text{ [calorías]}} = \frac{75 \cdot 3600 \text{ [mkg]}}{3750000 \text{ [calorías]}}$$

Para expresar el numerador también en calorías, hay que tener presente que 0,427 [mkg] corresponden a 1 caloría, de modo que

$$\text{Rend. económico} = \frac{75 \cdot 3600}{0,427} = \frac{632000}{3750000} = 0,17.$$

Este resultado nos dice que sólo el 17% del calor se convierte en trabajo.

El rendimiento de una máquina a vapor es muy pequeño. Como depende de la diferencia entre la temperatura de la caldera y la del condensador, podríamos aumentarlo, elevando la temperatura del vapor y bajando la del condensador. La temperatura del vapor sólo se puede elevar hasta  $t = 350^\circ$  Celsius la que corresponde a la presión de 166 [atm], porque con la elevación de temperatura más insignificante aumenta tanto la tensión del vapor, que es un grave peligro para las calderas. Enfriar el condensador es también imposible por el enorme gasto que esto representaría.

Por tales motivos ha sido necesario reemplazar el vapor por otros cuerpos intermediarios y estos son el aire caliente o mezclas explosivas de gases, cuya tensión aumenta en razón directa a la temperatura absoluta  $T$ , según la ecuación:

$$p_t = p_o \left( 1 + \frac{1}{273} t \right) = p_o \frac{273 + t}{273}$$

$$p = p_o \frac{T}{273}$$

Este ha sido el motivo de la construcción de los motores a gas, llamados también motores a explosión y en los cuales podemos subir la temperatura  $T_1$  hasta  $2000^\circ$ .

### Motores a explosión.

En los motores a explosión el émbolo se mueve impelido por la enorme fuerza expansiva que se produce durante las explosiones. Distinguimos **motores a gas** y **motores a líquido**; en los primeros se aprovechan con preferencia el gas de alumbrado y el gas pobre

(mezcla de H y CO) mezclados con aire en cierta proporción fija; en los segundos con preferencia bencina, petróleo y alcohol mezclados con aire. Pero estos motores exigen todavía otro aparato llamado **carburador** que sirve para transformar el líquido en vapor. Además sirve este aparato de regulador, pues si hay exceso de bencina ésta no se quema en su totalidad por falta de oxígeno y se pierde y, si su cantidad es escasa, la explosión pierde en intensidad.

Un motor de un cilindro tiene cuatro fases bien marcadas (fig. 93).

I. fase (**aspiración**): el émbolo *d* pasa el punto muerto superior y se retira produciendo en la cámara *e* un enrarecimiento del aire, se abre la válvula de admisión y entra por el tubo *m* la mezcla explosiva.

II. fase (**compresión**): se cierran las dos válvulas, el émbolo vuelve al interior comprimiendo la mezcla.

III. fase (**expansión**): tan luego como el émbolo pasa al punto muerto, salta una chispa en la bujía *s*, estando las dos válvulas cerradas, se produce la explosión y la fuerza expansiva de los gases empuja el émbolo produciendo trabajo.

IV. fase (**expulsión**): la válvula de escape se abre y el émbolo al volver al interior expulsa los gases resultantes de la combustión por el tubo *n*.

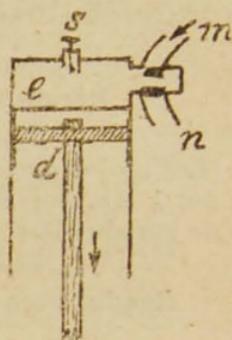


Fig. 93

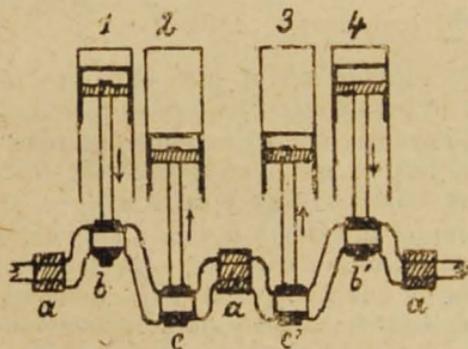


Fig. 94

A continuación se repiten las cuatro fases anteriores.

Las cuatro fases indicadas corresponden a dos vueltas completas del árbol cigüeñal y durante ellas el cilindro ha producido trabajo durante la cuarta parte, lo que impide un funcionamiento regular.

Al partir el motor hay que girar el cigüeñal en una vuelta como mínimo para vencer las dos primeras fases, lo que se hace a mano empleando la manivela o por medio del motor de partida.

Para producir un movimiento más regular y aumentar la potencia del motor se aumenta el número de cilindros; muy usado en los automóviles es el motor de cuatro cilindros, los que se acoplan de modo que cada uno tenga una fase distinta a los demás.

Por ejemplo, supongamos que se pasan los puntos muertos en el motor de cuatro cilindros (fig. 94) y que el movimiento completa cuatro fases sucesivas.

	1.	2.	3.	4.
I fase:	aspiración	compresión	expulsión	expansión
II fase:	compresión	expansión	aspiración	expulsión
III fase:	expansión	expulsión	compresión	aspiración
IV fase:	expulsión	aspiración	expansión	compresión.

Estas fases se suceden indefinidamente y en todo momento un cilindro produce trabajo.

### Rendimiento de un motor a explosión.

Los mejores motores a gas de alumbrado gastan 0,385 [m<sup>3</sup>] de gas por 1 HP por hora y como el calor de combustión de 1 [m<sup>3</sup>] de gas de alumbrado es de 4700000 calorías, el

$$\text{Rendimiento económico} = \frac{1 \text{ [HP por hora]}}{0,385 \cdot 4700000 \text{ [calorías]}}$$

y como 1 HP por hora corresponde a 75 · 3600 [mkg] y 0,427 [mkg] corresponden a 1 caloría resulta el

$$\text{Rend. económico} = \frac{75 \cdot 3600}{0,427} \frac{\text{[calorías]}}{1809500 \text{ [calorías]}} = \frac{632000}{1809500} = 0,35.$$

El rendimiento es del 35%, mucho mayor que el de una máquina a vapor; sin embargo no se puede decir si ésta es más o menos económica que el motor. Por un lado el combustible para la máquina a vapor es mucho más barato, pero por el otro exigen instalaciones más complicadas como las del fuego y de la caldera, una atención continua y hay que calentar la caldera mucho tiempo antes de usar la máquina, mientras que el motor está en cada momento listo para el uso. La experiencia ha enseñado, que para instalaciones pequeñas son más económicos los motores y para instalaciones grandes las máquinas a vapor.

En los últimos años los motores a explosión han encontrado un competidor muy importante en el

### Motor Diesel.

Este motor trabaja también en cuatro fases. En la primera fase el cilindro se llena de aire puro que en la segunda es comprimido hasta 30 [atm]. A esta presión el aire comprimido ha alcanzado una temperatura de 600° a 700° y cuando se inyecta ahora por medio de aire comprimido, petróleo crudo o alquitrán líquido, éste se inflama y se quema. Por el calor de combustión desarrollado en este mo-

mento aumenta considerablemente la tensión, que empuja en la tercera fase el émbolo hacia afuera, efectuando el trabajo útil. En la cuarta fase se expulsa los gases quemados. El aire comprimido que se necesita para inyectar el combustible se obtiene por medio de un compresor, cuyo émbolo está acoplado con el árbol del motor y que se acumula en un recipiente de acero, donde alcanza una presión de 60 [atm]. Además el mismo compresor comprime aire en un segundo depósito hasta 15 [atm], el que se aprovecha para poner en movimiento el motor.

El motor Diesel es un **motor de combustión** y no a explosión como los de gas y bencina.

Un motor Diesel de 600 HP gasta por HP y por hora 180 [gr] de combustible, cuyo calor de combustión es de 10000 calorías y por consiguiente su

$$\text{Rend. económico} = \frac{1 \text{ [HP por hora]}}{180 \cdot 10000} = \frac{632000}{1800000} = 0,35.$$

El rendimiento del motor Diesel es igual al de los motores a explosión, pero como el combustible que gasta es mucho más barato, trabaja más económicamente y por este motivo ya ha reemplazado al motor a explosión en muchas instalaciones.

#### Preguntas.

- 1) ¿Por qué nos frotamos las manos cuando hace frío?
- 2) ¿Por qué vemos a veces chispas cuando un caballo da una patada contra el pavimento?
- 3) ¿Por qué es necesario aceitar los ejes de los carros de los trenes?
- 4) ¿De qué manera podemos explicar por la teoría termodinámica la vaporización, condensación, calor de vaporización y la tensión de los vapores?
- 5) ¿Por qué se ponen incandescentes los aerolitos y estrellas fugaces al penetrar en la atmósfera terrestre?
- 6) ¿Se convierte en el aparato de Joule todo el trabajo efectuado por el peso *P* en calor?

#### Problemas.

- 1) Un cuerpo de 8 [kg] cae de una altura de 100 [m]. ¿Qué cantidad de calor se produce al chocar contra la tierra?
- 2) ¿Cuál es el equivalente mecánico del calor necesario para calentar 10 [kg] de agua de 0 a 20°?
- 3) ¿Cuál es el equivalente térmico del trabajo por el cual se levantan 2 toneladas a la altura de 100 [m]?
- 4) ¿De qué altura tendría que caer un trozo de hielo para que por el choque contra la tierra se transforme en vapor de 100°?
- 5) El diámetro interior del cilindro de una máquina a vapor de alta tensión es de 84 [cm]; el vapor tiene una tensión de 204 [cm] de mercurio. ¿Cuál es la fuerza que mueve el émbolo, si la presión atmosférica es de 72 [cm]?
- 6) El diámetro del cilindro de una máquina a vapor de alta tensión es de 60 [cm]; la carrera del émbolo de 40 [cm] y el número de revoluciones es de 30 por min. ¿Cuál es la potencia de la máquina, si el manómetro de la caldera marca 10 [atm]?

7) El cilindro de una máquina de expansión con condensación tiene un diámetro interior de 56 [cm] y un largo de 1,2 [m] y da 54 vueltas por min. ¿Cuál es su potencia si la tensión del vapor es de 1,8 [atm], la del condensador de 0,1 [atm] y la entrada del vapor al cilindro se cierra cuando el émbolo ha recorrido  $\frac{1}{4}$  de su camino?

### Ejercicios prácticos.

- 1) Determinar el equivalente mecánico del calor según el método de Joule.
- 2) Determinar la potencia de la máquina a vapor cuyo modelo tiene el liceo.

## Propagación del calor.

**127. Experimento:** Tomemos una varilla metálica por un extremo y coloquemos el otro sobre una llama.

Pronto sentiremos el calor en la mano hasta el punto de quemarnos.

**128. Experimento:** Retiremos la varilla de la llama y acerquemos la mano al extremo caliente.

Sentiremos el calor a distancia y notaremos que la varilla se enfría rápidamente.

En el primer caso, las partículas de la llama en su oscilación rápida chocan con las del extremo de la varilla, aumentando su velocidad por lo que sube la temperatura. Estas moléculas transmiten su movimiento a las vecinas de la varilla, a causa de la cohesión, de modo que también allí debe resultar una elevación de temperatura y así sigue propagándose el calor hasta el otro extremo.

El calor avanza dentro de la varilla sin dejar de ser calor: es la **propagación por conductibilidad**.

En el segundo caso también recibe el cuerpo frío (la mano) calor del cuerpo caliente (la varilla) a través de un tercer medio como el aire que se mantiene a la misma temperatura. El resultado es el mismo a través del vacío donde no hay moléculas ponderables; en esta parte del espacio no puede haber calor, cuya naturaleza consiste según la teoría termodinámica en el movimiento de las moléculas.

¿Cómo ha llegado entonces el calor a nuestra mano?

Este fenómeno se explica suponiendo la existencia de un medio invisible e imponderable, llamado **éter**, que llena todo el universo, aun los espacios intermoleculares de los cuerpos. Las oscilaciones de las moléculas del cuerpo caliente se transmiten al éter que se encuentra entre ellas y su movimiento se propaga en forma de ondas por el éter y al llegar a las partículas del éter que se encuentran den-

tro del otro cuerpo, este movimiento produce un aumento de la velocidad de las moléculas del cuerpo y por esto una elevación de temperatura: es la **propagación por irradiación**.

El calor radiante no es calor, es un movimiento ondulatorio del éter producido por el calor y después otra vez convertido en calor, un fenómeno idéntico a la propagación de la luz y por esta razón lo estudiaremos detalladamente en la óptica y nos preocuparemos aquí sólo de la propagación por conductibilidad.

## Conductibilidad de los cuerpos sólidos.

**129. Experimento:** Repitamos el experimento 128 con una varilla de vidrio de iguales dimensiones que la varilla metálica y después con una varilla de madera.

A través del vidrio demora más el calor en llegar a la mano; la madera se quema sin que el calor llegue por ella a la mano.

No todos los cuerpos conducen, pues, el calor con la misma rapidez; por esto se distinguen en la práctica cuerpos **buenos** y **malos conductores del calor** y como ejemplos podemos citar el metal y la madera, respectivamente; entre ellos figuran los cuerpos **semi-conductores** que no son ni buenos ni malos, como por ejemplo, el vidrio.

Otros semi-conductores son casi todas las piedras y el hielo; además de la madera, conducen muy mal el calor, el papel, la lana, la seda, las plumas, el corcho, la paja, la ceniza, los cabellos, el azufre, la nieve y la ebonita.

Los cuerpos malos conductores del calor se emplean como **aisladores térmicos**.

**130. Experimento:** Dejemos pasar vapores de agua hirviente por un tubo horizontal (fig. 95) que está atravesado por los extremos de una serie de varillas metálicas verticales (cobre, latón, zinc, estaño, fierro, plomo) cubiertas de una pintura roja de una sal doble de  $\text{Cu I}_2$  y  $\text{Hg I}_2$  que tiene la propiedad de ponerse negra desde los  $75^\circ$  y observemos con qué rapidez avanza el color negro hacia los extremos inferiores de las distintas varillas.

Vemos que los metales poseen una conductibilidad muy desigual; el color negro avanza muy pronto, hasta el extremo en la varilla de  $\text{Cu}$ , menos ligero en el latón y el zinc, menos aún en el es-

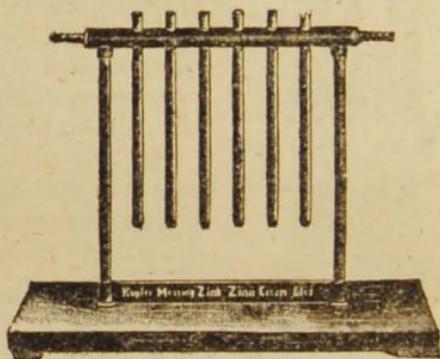


Fig. 95

taño y el fierro, y casi nada en la varilla de plomo. La plata es el mejor conductor del calor.

**131. Experimento:** Cubramos con cera una tablita de madera, cortada paralelamente a la fibra (sumergiéndola un momento en cera líquida) y clavémosla con una punta metálica calentada hasta el rojo.

La cera se funde más rápidamente en la dirección de la fibra que perpendicularmente a ella, lo que nos dice que el calor se propaga más ligero en la primera que en la segunda dirección; en cualquiera otra dirección se propaga con una velocidad que está comprendida entre ambas. Alrededor de la punta metálica se forma una elipse de cera fundida. Si la propagación del calor en todos sentidos hubiera sido la misma, habría resultado una circunferencia en lugar de una elipse.

En algunos cristales como el cuarzo y la calcita podemos observar el mismo fenómeno.

En la vida ordinaria encuentran muchas aplicaciones la mala y la buena conductibilidad calórica de los cuerpos. Para proteger las cosas contra el frío, se las envuelve en cuerpos malos conductores: en el invierno se envuelven en paja las plantas y los árboles. Para evitar que se funda el hielo, lo forramos en paja o sacos. El mismo papel aislador desempeñan nuestros vestidos, que impiden la irradiación del calor de nuestro cuerpo.

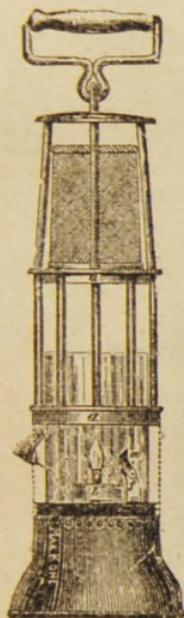


Fig. 96

**132. Experimento:** Coloquemos bajo una rejilla fina de latón un mechero de gas; encendamos primero el gas sobre la rejilla y después de haberlo apagado, debajo de ella.

La llama no pasa a través de la rejilla, de modo que en el primer caso sólo arde el gas sobre la rejilla y en el segundo caso solamente debajo de ella. El calor de la llama se propaga rápidamente por los alambres en todos sentidos por ser el metal un buen conductor, no bastando el remanente para encender el gas al otro lado de la rejilla.

Esta propiedad de las rejillas finas se aprovecha en la construcción de la **lámpara de seguridad de Davy** (fig. 96) que se emplea en las minas de carbón para evitar las explosiones del gas grisú mezclado con aire: consta de una lamparilla ordinaria de aceite cuya llama está rodeada por un tubo cilíndrico de vidrio y que lleva encima un cilindro de rejilla metálica muy fina con su cara superior cerrada.

Cuando el minero llega con ella a una región donde hay gas grisú, éste penetra a la lámpara y se enciende provocando pequeñas explosiones, pero la llama no pasa por la rejilla y se evita una ex-

plosión en gran escala. El minero ve el peligro que le amenaza y se aleja inmediatamente de la galería.

Podemos mostrar el funcionamiento de la lámpara, lanzando sobre ella un chorro de gas.

## Conductibilidad de los cuerpos líquidos.

**133. Experimento:** Calentemos una probeta con agua por la parte superior, observando la temperatura en un termómetro sumergido hasta el fondo.

El agua puede calentarse en la parte superior hasta hervir manteniéndose fría abajo, lo que indica que el agua conduce mal el calor; su conductibilidad es casi 700 veces menor que la del cobre y la de los otros líquidos mucho menor todavía.

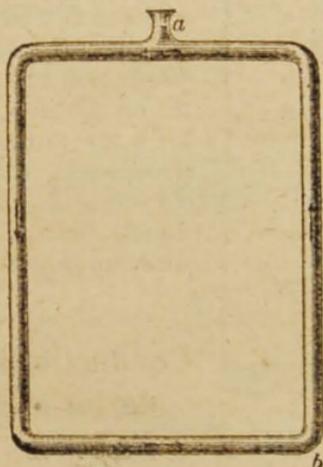


Fig. 97

**134. Experimento:** A un vaso con agua echémosle algunos trocitos de permanganato de potasio que se disolverán en el fondo formando una capa fuertemente coloreada; calentemos después el centro del fondo por medio de una llama pequeña.

Una columna de agua coloreada se levanta rápidamente, se ensancha arriba y baja por los lados, semejando una erupción volcánica.

El agua al calentarse se dilata, disminuye su densidad y sube; el agua fría de la parte superior baja a reemplazar al agua caliente, de modo que se forman corrientes de agua caliente hacia arriba y de agua fría hacia abajo; este fenómeno se llama **convección** y a ella se debe que todo el líquido se calienta con rapidez, a pesar de su mala conductibilidad; en realidad el líquido se revuelve.

El agua se calienta en *b* y se forma una corriente ascendente que recorre todo el tubo, lo que se hace visible por la solución de permanganato de potasio que arrastra consigo.

**135. Experimento:** Llenemos con agua un tubo de vidrio en forma de rectángulo (fig. 97) y provisto de una abertura donde colocamos un poco de permanganato de potasio y calentemos en *b* el tubo.

El agua se calienta en *b* y se forma una corriente ascendente que recorre todo el tubo, lo que se hace visible por la solución de permanganato de potasio que arrastra consigo.

El experimento nos hace comprender fácilmente la aplicación importante que ha encontrado la **convección** en la **calefacción** de las habitaciones por medio del agua caliente.

La fig. 98 da una idea de tal instalación. En el subterráneo de la casa se encuentra la caldera *A* que por el tubo *B* está en comunicación con un estanque de agua *C* bajo el techo y del cual parten tubos que terminan en las calderas, pasando por los radiadores *E* de las distintas piezas. Primero se llenan el estanque y los tubos y en seguida se enciende el fuego. El agua caliente recorre como en el experimento 135 todos los tubos, subiendo por la cañería *B* y bajando por las *D* y *F*. Al pasar por los radiadores *E* cede el calor a las piezas por irradiación, volviendo fría a la caldera donde se calienta nuevamente.

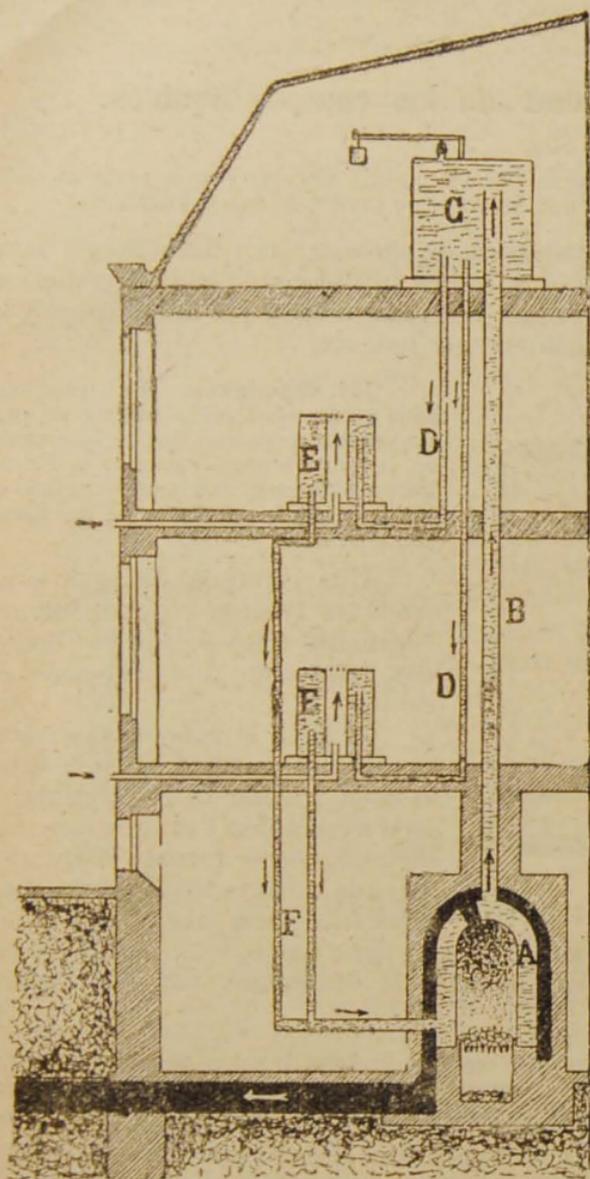


Fig. 98

### Conductibilidad de los cuerpos gaseosos.

**136. Experimento:** Calentemos el extremo cerrado de un tubo de ensaye, tomándolo con el extremo abierto hacia abajo y observemos un termómetro que introducimos un poco en él.

La temperatura no sube, porque la conductibilidad del aire es peor que la

del agua, es casi 1 900 veces menor que la del cobre.

**137. Experimento:** Pongamos dentro de un tubo de vidrio, dividido en dos compartimentos un alambre delgado de fierro (fig. 99) y calentémoslo hasta la incandescencia por medio de una corriente eléctrica; en seguida reemplacemos en la

mitad derecha del tubo el aire por hidrógeno (o gas de alumbrado) y dejemos pasar otra vez la corriente.

La segunda vez sólo se pone incandescente el alambre en el aire, mientras que en el hidrógeno (o gas de alumbrado) queda obscuro.

La única explicación de este fenómeno es que el hidrógeno (o gas de alumbrado) conduce el calor mejor que el aire; se pierde por su mejor conductibilidad tanto calor del alambre que el remanente no basta para ponerlo incandescente. El hidrógeno conduce 7 veces mejor el calor que el aire.

**138. Experimento:** Introduzcamos humo de cigarro en la parte inferior de un vaso y cuando esté en reposo, calentemos el centro del fondo por medio de una llama pequeña.

Observamos un fenómeno muy parecido al del experimento 134. El humo sube, se ensancha arriba y baja por los lados.

El humo y el aire se calientan, disminuye su densidad y suben y son reemplazados por aire frío que baja. Es también la **con-**

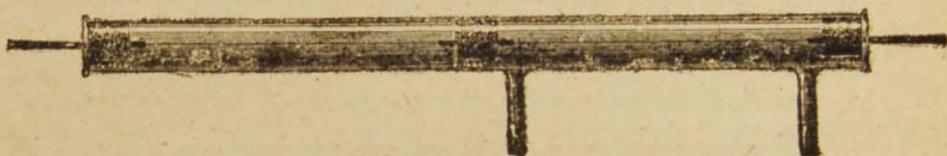


Fig. 99

**vección** la que en los gases (por las corrientes calientes y frías) reparte el calor sobre toda la masa.

**139. Experimento:** Pongamos sobre una cápsula de fierro con arena un tubo de lámpara en cuyo extremo inferior terminan dos tubos de vidrio angostos horizontales; calentemos la cápsula y acerquemos a los extremos de los tubos horizontales y del tubo de lámpara un fósforo encendido.

En los tubos se producen corrientes de aire tan fuertes, que el fósforo se apaga.

Este experimento nos explica por qué las chimeneas son tan necesarias en la práctica, siempre que se desea una combustión buena; el aire caliente sube por la chimenea y produce el **tiraje**, haciendo entrar aire atmosférico, rico en oxígeno, por el fogón.

También en la naturaleza podemos observar la convección en grande escala. Durante el día, la tierra se calienta más fácilmente y con más intensidad que el mar. En las costas de los países templados, hacia las nueve de la mañana se produce sobre la tierra una corriente ascendente de aire caliente que es reemplazado por el aire frío procedente del mar (**brisa del mar**). Por la noche, en cambio, se enfría con más rapidez e intensidad la tierra que el mar y la bri-

sa del mar es reemplazada por la **brisa de la tierra**, que se dirige hacia el mar.

El aire caliente del ecuador asciende en la atmósfera y es reemplazado por el aire frío procedente de regiones más próximas a los polos; estas corrientes de aire se llaman **vientos alisios**. Tiene que haber corrientes superiores que se dirigen del ecuador hacia los polos y constituyen los **antialisios**. A causa de la rotación de la tierra hacia el este, el alisio que debería tener la dirección N-S, se inclina hacia el oeste, de modo que el alisio del hemisferio norte, en vez de ser un viento N, es un viento N-E, y el del hemisferio sur es un viento S-E, en lugar de un viento S.

Entre ambas corrientes se encuentra la **zona de las calmas**, donde no sopla viento, porque allí el aire menos denso sube.

### Preguntas.

1) ¿Por qué se pone a las cafeteras, planchas y puertas de estufas mangos de madera o de otra substancia aisladora?

2) ¿Qué ventaja tiene la nieve para los sembrados?

3) ¿Por qué se construyen las cámaras frigoríficas y las cajas contra incendios con dobles paredes y se llena de ceniza el espacio entre ellas?

4) ¿Por qué se construyen en las regiones frías las casas con dobles ventanas?

5) ¿Qué objeto se siente más frío en una pieza, uno de metal, de madera o de género?

6) ¿En qué mano se siente más frío, en la que sumergimos en mercurio o en la que sumergimos en agua de la misma temperatura? ¿Qué sensación calórica resulta, si el mercurio y el agua se encuentran a temperaturas más altas que la de nuestro cuerpo?

7) ¿Cómo se explica que nos quemamos en agua hirviendo, mientras que podemos pasar bastante tiempo en un horno a una temperatura más alta?

8) ¿Cuál es la verdadera causa de la mala conductibilidad de la paja, la lana, la pluma y la ceniza?

9) ¿Cómo se explica que nos parece insoportable el aire a 33°, mientras que un baño de agua de la misma temperatura nos agrada?

10) ¿En qué caso se hielan más ligero los pies, cuando están en contacto con un piso de piedra o de madera? (Ventaja de los zuecos).

11) ¿En qué caso se apaga más ligero un carbón incandescente, cuando lo echamos sobre metal o madera?

12) ¿Bajo qué techo se siente más calor en el verano, de paja o de zinc? ¿Sucede lo mismo en el invierno?

13) ¿Qué dirección toma la llama de una vela, cuando se la coloca abajo, al medio o arriba de una puerta entreabierta que comunica la pieza con otro espacio más frío?

14) ¿Qué ventaja tiene el uso del tubo en las lámparas?

15) ¿Por qué podemos ventilar una pieza más fácilmente en el invierno que en el verano?

16) ¿Dónde conviene colocar los radiadores que sirven para calentar las habitaciones, abajo o arriba?

# Magnetismo.

## Imanes naturales y artificiales.

**140. Experimento:** Pongamos un trozo de óxido magnético de hierro ( $\text{Fe}_3 \text{O}_4$ ) sobre limaduras o clavitos del mismo metal.

Al levantarlo las limaduras o los clavos han adherido al óxido de hierro.

Este mineral, cuya propiedad atractiva conocieron ya los antiguos, fué encontrado primeramente en las cercanías de la ciudad de Magnesia en Asia Menor, y por este motivo se le llamó **magnetita**, palabra de la cual derivan las otras que se refieren a los fenómenos conocidos como **fenómenos magnéticos**. Pero no solamente en Magnesia se encuentra este mineral sino que está muy esparcido por toda la tierra y abunda sobre todo en Suecia, Noruega y en los montes Urales. Un trozo de este mineral que tiene por naturaleza la propiedad de atraer el hierro, se llama **imán natural**.

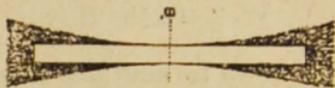


Fig. 100

**141. Experimento:** Frotemos una varilla de acero con un imán natural y pongámosla en seguida sobre limaduras de hierro.

Las limaduras adhieren a ella acumulándose en gran cantidad cerca de los extremos formando filamentos y disminuyendo hacia el medio hasta desaparecer completamente (fig. 100).

La varilla se ha convertido en un imán y, para distinguirlo del imán natural, se llama **imán artificial**.

El plano medio *mm*, donde no existe fuerza magnética puesto que no adhieren las limaduras, es la **zona neutra** y los puntos cerca de los extremos, donde la fuerza llega a su máximo, son los **polos del imán**.

**142. Experimento:** Suspendamos un imán artificial por medio de un hilo o coliquémoslo sobre un eje vertical de modo que pueda girar libremente en un plano horizontal y observemos la dirección en que se detiene.

Después de efectuar algunas oscilaciones toma una dirección que casi coincide con la norte-sur geográfica.

**143. Experimento:** Marquemos el polo que se dirige al norte con tiza azul y aquel que se dirige al sur con tiza lacre; giremos ahora el imán, soltémoslo y observemos la posición en que queda cuando vuelva al reposo.

El imán vuelve a su posición anterior. Siempre es un mismo polo del imán el que se dirige hacia el norte y se le denomina **polo norte** (azul), el otro que se dirige siempre hacia el sur es el **polo sur** (lacre).

## Acción recíproca de los polos.

**144. Experimento:** Colguemos un imán de modo que pueda girar horizontalmente y acerquémonos al polo norte (azul) otro norte (azul) y al polo sur (lacre) otro sur (lacre) y después a un polo norte un polo sur.

Observamos que el polo del imán suspendido sufre repulsión si le acercamos un polo del mismo nombre y atracción, si le acercamos un polo de nombre contrario, lo que se expresa por la ley:

**Los polos magnéticos del mismo nombre se repelen y los de nombre contrario se atraen.**

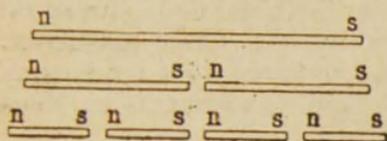


Fig. 101

**145. Experimento:** Rompamos una varilla imanada por la mitad y acerquemos sus extremos a un imán colgado por su centro.

Encontramos polos en cada extremo de las dos mitades de los cuales uno es norte y el otro sur, es decir, que se forman dos imanes completos (fig. 101).

**146. Experimento:** Sigamos quebrando las mitades y examinando los polos magnéticos de cada trozo.

Siempre resultan imanes completos hasta las partículas más pequeñas y nunca obtendremos un imán con un solo polo (fig. 101).

## Imanación por influencia.

**147. Experimento:** Mantengamos fijo un trozo de fierro dulce *A* (fig. 102), acerquémonos el polo *N* de un imán *I* y examinemos los extremos del fierro dulce acercándoles un polo de una aguja magnética.

El fierro dulce *A* instantáneamente se ha convertido en un imán y en el extremo más cercano al imán *I* se ha formado un polo sur *s* y un norte *n* en el otro extremo.

Tal imanación momentánea se llama **imanación por influencia**.

**148. Experimento:** Mostremos la existencia del magnetismo en el fierro dulce *A* adhiriéndole un trozo *B* de fierro (fig. 102).

**149. Experimento:** Alejemos el imán *I* del fierro dulce *A* y acerquemos el polo norte de una aguja magnética a los extremos de *A*.

El trozo *B* cae y los dos extremos de *A* atraen al polo norte, lo que nos dice que el fierro dulce ha perdido su magnetismo.

**150. Experimento:** Acerquemos el imán *I* al trozo *A* (fig. 102) variando las distancias y veamos el tamaño máximo de los clavos que son retenidos por el trozo convertido en un imán.

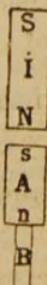


Fig. 102

El clavo sostenido por el trozo *A* es tanto menor cuanto mayor es la distancia.

**La imanación por influencia es tanto mayor cuanto más pequeña es la distancia entre el imán y el trozo de hierro.**

**151. Experimento:** Repitamos el experimento 149 reemplazando el fierro dulce por acero y acerquémosle un clavo.

El acero no adquiere instantáneamente las propiedades magnéticas y no atrae al clavo; pero las adquiere sometiéndolo durante largo tiempo a la influencia del imán y las retiene aunque éste se aleje.

El acero se convierte en un **imán permanente**, mientras que el fierro dulce sólo en un **imán temporal**.

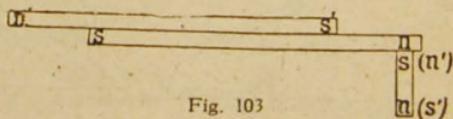
Para explicar esta diferencia entre el fierro dulce y el acero, se ha supuesto la existencia de una fuerza especial, llamada **fuerza coercitiva**, que hay que vencer si se quiere imanar o desimanar el fierro o el acero. Esta fuerza parece nula en el fierro dulce, puesto que este metal se imana instantáneamente, y en el acero es tanto mayor cuanto más templado está. Una vez imanado el acero, la misma fuerza se opone a la desimanación.

**152. Experimento:** Acerquemos el polo norte de un imán primero al polo sur y después al polo norte de una aguja magnética, variando en el segundo caso la distancia entre los polos.

El polo norte del imán produce por influencia en el polo cercano de la aguja magnetismo sur, aumentando así su magnetismo sur permanente en el primer caso y debilitando su magnetismo norte en el segundo caso. Variando el poder magnético del imán y la distancia a la aguja puede resultar magnetismo sur por influencia en menor, igual o mayor cantidad que el magnetismo norte permanente de la aguja y obtenerse debilitamiento, anulación o inversión de los polos, y en el último caso, los polos del mismo nombre aparentemente se atraen.

## Magnetismo latente y libre.

**153. Experimento:** Sobre un imán *ns* que tiene adherido un trozo de hierro dulce (fig. 103) resbalemos un segundo imán *n's'* de igual poder y con sus polos invertidos con respecto al anterior y observemos lo que sucede con el hierro dulce cuando el polo *s'* se acerca al polo *n*.



El trozo de hierro bambolea y cae.

El polo *n* produce un polo sur arriba y un norte abajo en el fierro dulce, pero el polo *s'* del segundo imán produce en los mismos extremos polos contrarios que neutralizan a los anteriores y, por este motivo, el fierro cae.

Vemos que la acción exterior de los dos imanes así unidos es nula, aunque el magnetismo de los polos  $n'$  y  $s'$  ha aumentado por influencia mutua. En este caso se dice que el magnetismo de los imanes está **latente**.

**154. Experimento:** Repitamos el experimento anterior, pero acercando ahora el polo norte  $n'$  del segundo imán al polo norte  $n$  del primero y veamos cómo varía ahora la fuerza atractiva.

Los polos  $n$  y  $n'$  producen en el extremo superior del hierro dulce un polo sur, de modo que aumenta el poder atractivo entre el imán y el hierro, lo que se comprueba por el mayor número de trozos de hierro dulce que puede sostener.

En este caso se dice que el magnetismo está **libre**.

Aun cuando los dos imanes sean exactamente iguales, su magnetismo libre no puede ser igual al duplo del de cada uno de ellos porque cada uno de los polos nortes produce en el otro un sur, debilitándose mutuamente.

### Influencia del calor sobre los imanes.

**155. Experimento:** Juntemos 4 alambres de acero imanados de modo que coincidan los polos del mismo nombre y acerquemos el polo norte del conjunto al polo norte de una aguja magnética, de modo que ésta se desvíe bastante. En seguida calentemos los alambres de acero hasta el color rojo y observemos el movimiento de la aguja.

La desviación de la aguja disminuye a medida que sube la temperatura de los alambres.

**El calor destruye el magnetismo.** El acero pierde poco a poco su temple y se convierte en hierro dulce; por esto pierde su fuerza coercitiva y con ella su imanación.

### Métodos de imanación.—Haces magnéticas.

El método más sencillo para obtener un imán consiste en frotar a una varilla de acero varias veces en la misma dirección con un polo de un imán poderoso.

Pero por este procedimiento se forman a veces imanes con **puntos consecuentes** o sea **polos secundarios** entre los de los extre-



Fig. 104

mos. Como esto es un gran inconveniente para las agujas magnéticas que se usan en la construcción de las brújulas marinas y de los galvanómetros que estudiaremos más adelante, se aplica en tales casos otro método de imanación debido a **Duhamel**.

La barra  $BC$  (fig. 104) que se va a imanar se coloca de modo que uno de sus extremos  $B$ , se coloque sobre el polo norte  $n$  de un

imán y el otro extremo sobre el polo sur  $s$  de otro imán; el medio puede descansar sobre un pedazo de madera  $A$ . Otros dos imanes se colocan con sus polos norte y sur,  $n'$  y  $s'$ , tocando la barra en el centro de modo que el norte esté al lado que descansa sobre el polo norte  $n$ , ambos imanes forman un ángulo de  $25^\circ$  con la barra y se mueven en sentido contrario, pero manteniéndose paralelamente a sí mismos, hasta  $n''$   $s''$  en los extremos  $B$  y  $C$ , y se levantan entonces para colocarlos nuevamente al centro; esta operación se repite muchas veces. En el extremo  $B$  se forma el polo sur y en  $C$  el polo norte.

Es imposible aumentar indefinidamente por frotamiento el poder magnético de un imán; llega un momento en que todo esfuerzo se hace inútil y se dice entonces que la varilla de acero está **saturada de magnetismo**.

Es muy difícil imanar una barra gruesa hasta su saturación y para obtener imanes poderosos se emplean muchas láminas delgadas que son mucho más fáciles de imanar y se las junta después con sus polos del mismo nombre en igual sentido, pero de modo que no se sobrepongan por completo los polos, porque, según sabemos, se influyen unos a otros y aminoran su fuerza. Se coloca una lámina más larga al centro (fig. 105) y a ambos lados otras más y más cortas. Este conjunto es un **haz magnético**.

La fuerza del haz nunca se iguala a la suma de las fuerzas de las láminas que lo constituyen por

los motivos que ya se han indicado al hablar del magnetismo latente y libre.

Para aprovechar la fuerza atractiva de los dos polos a la vez se da a los imanes la forma de herradura (fig. 106) y para aumentarla más todavía se les agrega una armadura, que consiste en un pedazo de hierro dulce puesto en contacto con los polos. Ambos polos no solamente producen en el hierro dulce los polos de nombre contrario  $n$  y  $s$ , sino que su acción se propaga a través de toda la armadura y favorecen así la formación de los polos  $s$  y  $n$ , de modo que la polaridad magnética del ancla se compone de  $2s$  y  $2n$ , respectivamente.

La armadura se aprovecha también para conservar el magnetismo de los imanes. Se colocan dos imanes en forma de barras invertidos, como lo indica la fig. 107 y se unen los extremos por medio

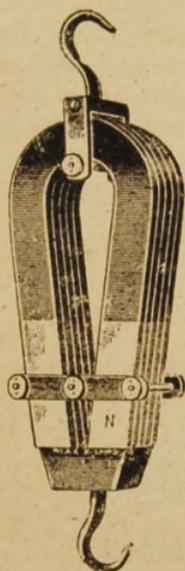


Fig. 106

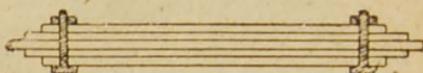


Fig. 105

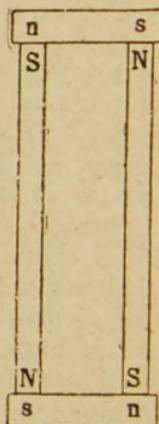


Fig. 107

de las armaduras sobre las cuales actúan los polos de la misma manera que hemos visto en el imán en forma de herradura.

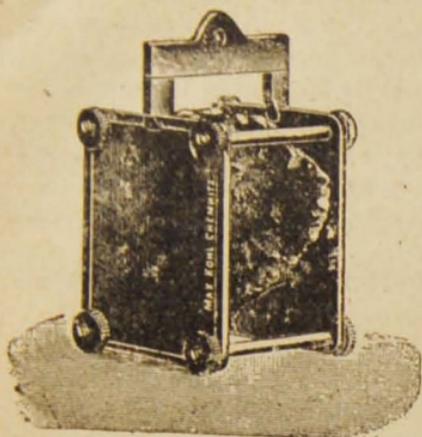


Fig. 108

La disposición de los imanes en esta forma es indispensable porque una barra magnética abandonada en una posición cualquiera podría perder su magnetismo a causa de la influencia de otros imanes. Del mismo modo se provee a los imanes naturales de armaduras (fig. 108). Se iman las dos láminas de hierro dulce, formando los polos que se unen por otro pedazo de hierro dulce para hacerlos actuar simultáneamente.

En la actualidad se fabrican los imanes por medio de la electricidad, procedimiento que conoceremos más adelante.

### Hipótesis sobre el magnetismo.

Conociendo las propiedades principales de un imán, podemos preguntarnos en qué consiste el magnetismo.

Antes se suponía que cada imán o pedazo de hierro dulce poseía dos flúidos imponderables que correspondían al magnetismo norte y al sur y cuyas partículas se repelían si eran del mismo flúido y se atraían si no lo eran.

Cada pedazo de hierro o acero poseía ambos flúidos a la vez y repartidos de tal modo que las partículas de uno y otro se neutralizaban, cuando el cuerpo estaba en estado desmagnético; si bajo la influencia de un imán, o por otra causa, ambos flúidos se separaban, se repartían de tal manera, que al medio, en la zona neutra, no quedaba nada y sobre una mitad se había distribuido el flúido sur y sobre la otra el norte aumentando la densidad desde la línea neutra hasta los polos donde alcanzaba su máximo.

Si esta hipótesis fuera exacta, al romper un imán por la zona neutra, ambos flúidos quedarían separados y tendríamos imanes con un solo polo, lo que está en contradicción con la experiencia, pues siempre resultan imanes con dos polos.

Debido a esta última causa fué reemplazada la teoría de los flúidos por la de los **imanes moleculares de Weber**.



Fig. 109

Según ésta, se supone que cada partícula de un trozo de hierro o acero es un imán, llamado **imán molecular**. Si la substancia se presenta desprovista de propiedades magnéticas, es debido al desorden de sus imanes moleculares que se neutralizan unos a otros (fig. 109).

Pero, bajo la acción de un imán, las moléculas se orientan de tal modo que presentan todas el polo norte en un sentido y el sur en sentido contrario (fig. 110).

Si la orientación de los imanes moleculares es perfecta se alcanza el máximo de potencia y se obtiene la saturación.

La fuerza coercitiva es, en tal caso, la resistencia opuesta a la rotación de las moléculas, fuerza casi nula en el hierro dulce, y considerable en el acero; esa misma fuerza impide la desorientación de las moléculas en el acero.

Esta fuerza coercitiva es la que se vence poco a poco por el frotamiento con imanes, explicado en los procedimientos de imanación.

Hasta cierto grado se puede reforzar también esta teoría por el siguiente

**156. Experimento:** Llenemos los dos tercios de un tubo de ensaye con limaduras de hierro, tapémoslo y acerquemos sus dos extremos a un polo de una aguja magnética; frotamos el tubo con un imán en el mismo sentido varias veces y examinemos los extremos como antes; sacudamos el tubo y volvamos a examinar los extremos.

Al principio, estando las partículas desorientadas, los dos extremos atraen al mismo polo de la aguja porque éste produce en cada extremo por influencia el polo contrario.

Frotando el tubo con un imán las partículas se orientan longitudinalmente y el conjunto presenta las propiedades características de un imán, de modo que ahora un extremo atrae y el otro repele a un mismo polo de la aguja magnética.

Sacudiendo el tubo, las partículas de hierro nuevamente se desorientan y los dos extremos vuelven a atraer indiferentemente a los polos de la aguja magnética.

Supongamos ahora que la barra esté saturada, es decir, que todos los imanes estén orientados. ¿Cómo podemos explicar por esta teoría la desigual distribución del magnetismo libre sobre la barra?



Fig. 110

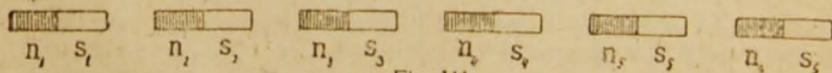
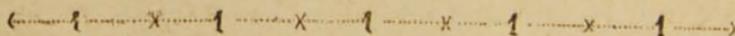


Fig. 111

Para esto vamos a considerar las 6 partículas de la figura 111. Cada molécula posee al principio la misma cantidad de magnetismo, pero por la influencia mutua tiene que resultar distinta. Así, por ej., la partícula I está sometida a la influencia de las partículas II a VI

y el efecto de la partícula II es mayor que el de la III y éste mayor que el de la IV, por ser menor la distancia. Si designamos las distancias por 1, 2, 3, 4, 5, tenemos magnetismo por influencia en la primera partícula

	$n_1 - s_1$	que corresponde a las distancias	1, 2, 3, 4, 5
el de	$n_2 - s_2$	»	»
	$n_3 - s_3$	»	»
	$n_4 - s_4$	»	»
	$n_5 - s_5$	»	»
	$n_6 - s_6$	»	»

de modo que la mayor cantidad de magnetismo se concentra en los polos  $n_3 - s_3$  y  $n_4 - s_4$  por ser para ellos menores las distancias entre ellos y los otros imanes moleculares; menor e igual para  $n_2 - s_2$  y  $n_5 - s_5$ ; y menor todavía e igual para  $n_1 - s_1$  y  $n_6 - s_6$ .

Se ve que en un imán, los imanes moleculares más fuertes se encuentran al medio y como  $n_3 > s_2$ ,  $n_2 > s_1$  y sobra  $n_1$  la mitad izquierda tiene magnetismo norte libre mientras que la otra mitad tiene magnetismo sur libre por ser  $s_4 > n_5$ ,  $s_5 > n_6$  y sobra  $s_6$ .

Para explicar el hecho de que el magnetismo libre es mayor en los extremos que en el medio, es necesario suponer que la diferencia entre las masas magnéticas  $n_3$  y  $s_2$  es menor que la entre  $n_2$  y  $s_1$ ; la zona neutra la tenemos entre las partículas III y IV donde se anula completamente el polo  $n_4$  por  $s_3$ .

La exactitud de estos últimos resultados puede ser comprobada por el

157. Experimento: Cortemos una varilla de acero en 6 pedazos iguales y después de haberlos juntado imanémoslos. En seguida separemos los pedazos y examinemos el poder magnético de cada uno determinando la masa de hierro dulce que pueden sostener.

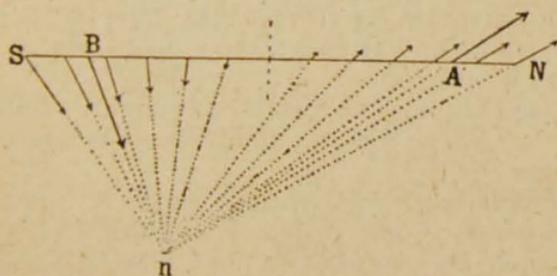


Fig. 112

Los pedazos 1 y 6 resultan igualmente imanados, lo mismo sucede con 2 y 5 y con 3 y 4; la mayor fuerza atractiva la poseen 3 y

4, menos 2 y 5 y la mínima 1 y 6; y la diferencia entre la fuerza atractiva de 3 y 2 es menor que la entre 2 y 1.

Si ahora acercamos al imán un polo  $n$  (fig. 112) sobre los distintos elementos actúa, según las masas magnéticas libres, repeliendo las masas magnéticas nortes y atrayendo las masas sures. Cada grupo de fuerzas podemos reemplazarlo por su resultante que aplica en puntos bien determinados que son  $A$  y  $B$  y estos puntos son los po-

los verdaderos del imán. Obtenemos la siguiente definición de los polos magnéticos de un imán:

**Los polos de un imán son los puntos de aplicación de las resultantes de todas las fuerzas atractivas y repulsivas con las cuales un polo magnético actúa sobre los distintos elementos del imán.**

Esto nos deja comprender que un imán actúa como si toda su fuerza magnética estuviera concentrada en sus polos. Para comodidad de expresión se habla de **masa magnética**, se la supone concentrada en los polos y si un imán en igualdad de condiciones actúa con fuerza doble o triple que otro, se dice que sus polos tienen doble o triple masa magnética.

## Ley de Coulomb.

En el primer capítulo hemos visto que entre los polos magnéticos actúan fuerzas atractivas y repulsivas.

Estudiemos los factores de los cuales depende el valor de dichas fuerzas empleando la balanza magnética siguiente (fig. 113).

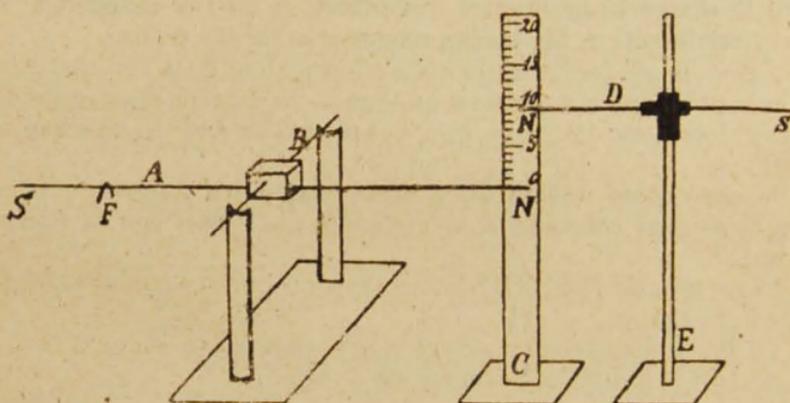


Fig. 113

La cruz está formada por dos agujas imanadas de acero *A A* cuyos polos contrarios se juntan dentro de un trozo de corcho. Por encima de dichas agujas y perpendicularmente a ellas se coloca otra aguja *B* que sirve de eje de rotación.

Detrás del polo libre *N* se coloca una regla vertical *C* dividida en mm y de tal modo que el extremo *N* quede frente a su punto 0.

La varilla izquierda *A* está dividida en mm y un pequeño jinete *F* de papel puede moverse sobre ella para hacer que *N* coincida con el punto 0.

Necesitamos además algunas agujas magnéticas igualmente imanadas y que pueden colocarse en la posición *D*, sostenidas por un soporte.

Si se coloca el imán *D*, entre los polos *N N* actúa una fuerza

repulsiva que rompe el equilibrio; para restablecerlo movemos el jinete  $F$  hacia la izquierda.

Fácilmente se demuestra (formando los dos momentos estáticos) que las fuerzas que actúan entre los polos son proporcionales a las distancias del jinete  $F$  al eje  $B$ .

**158. Experimento:** Coloquemos sucesivamente un mismo imán  $D$  con su polo  $N$  coincidiendo con los puntos 5, 10, 15 de la regla  $C$  y restablezcamos en cada caso el equilibrio, moviendo el jinete  $F$  y anotemos su distancia al eje  $B$  (fig. 113).

Si el imán  $D$  está en el punto 5 el jinete se coloca a la distancia  $a$  del eje  $B$ ; si se coloca en los puntos 10 y 15 dicha distancia se reduce a un cuarto y a un noveno de  $a$ .

**Para los mismos dos imanes la fuerza magnética que actúa entre sus polos varía en razón inversa al cuadrado de sus distancias.**

**159. Experimento:** Coloquemos sucesivamente 1, 2, 3 varillas igualmente imanadas en la división 5 y anotemos las distancias del jinete  $F$  al eje  $B$  a las cuales hay que colocarlo para restablecer el equilibrio.

Con 1 imán el jinete se coloca a cierta distancia, con 2 a la doble y con 3 a la triple distancia.

**Si la distancia permanece invariable, la fuerza magnética varía proporcionalmente a las masas magnéticas de los polos.**

Antes de poder formular matemáticamente la ley que nos da la fuerza atractiva o repulsiva que actúa en cualquiera condición de masa y distancia, tenemos que definir la **unidad de la masa magnética**.

Se elige como unidad de la masa magnética aquella que actúa sobre otra igual colocada a la distancia de 1 [cm] con la fuerza de 1 [dina].

Partiendo de esta definición y aprovechando las leyes anteriores, resulta que:

La masa magnética 1 actúa sobre otra masa magnética 1 a la distancia de 1 [cm] con la fuerza de 1 [dina].

1.ª masa magn.	2.ª masa mag.	distancia	fuerza
1	1	1 [cm]	1 [dina]
$m_1$	1	1 »	$m_1$ »
$m_1$	$m_2$	1 »	$m_1 m_2$ »
$m_1$	$m_2$	$r$ »	$\frac{m_1 m_2}{r^2}$ »

Designando esta fuerza por  $F$  y tomando en cuenta la naturaleza de las masas, obtenemos la **ley de Coulomb** en la forma:

$$(31) \quad F = \pm \frac{m_1 m_2}{r^2} \left[ \text{dinas} \right].$$

La fuerza con que se atraen o repelen dos polos magnéticos es

igual al producto de sus masas magnéticas dividido por el cuadrado de su distancia.

El signo positivo corresponde a dos polos del mismo nombre y el signo negativo a dos polos de nombres contrarios.

Aprovechando esta ley podemos reducir la unidad de la masa magnética a las unidades fundamentales. Para esto hacemos  $m_1 = m_2 = m$ , de modo que resulta:

$$F r^2 = m^2 \text{ y } m = \pm \sqrt{F r^2}$$

y substituyendo en esta ecuación las unidades, obtenemos:

$$m = \sqrt{1 \left[ \frac{\text{gr cm}}{\text{seg}^2} \right] \cdot 1 [\text{cm}^2]}; \quad m = \sqrt{1 \left[ \frac{\text{gr cm}^3}{\text{seg}^2} \right]}$$

$$m = 1 \left[ \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{seg}} \right].$$

## Campo magnético. Líneas de fuerza.

**160. Experimento:** Pongamos un imán poderoso en dirección vertical y acerquemos a su polo superior una pequeña aguja magnética que puede moverse libremente, variando la dirección entre ella y el polo.

En todas las direcciones el polo magnético ejerce influencia sobre la aguja, pero cuando ésta se aleja más allá de cierto límite deja de orientarse, porque la fuerza magnética del polo no tiene ya un valor apreciable. Teóricamente, sin embargo, según la ley de Coulomb, su acción llega a una distancia infinita.

Todo el espacio alrededor de un imán dentro del cual su acción sobre un polo magnético es apreciable, se llama su campo magnético.

La intensidad del campo magnético de un imán en un punto dado es una cantidad que, multiplicada por la masa magnética concentrada en este punto, nos da la fuerza con que el campo actúa sobre dicha masa.

Sea  $I$ , en cierto lugar, la intensidad del campo magnético; éste actúa en tal caso, sobre  $m$  unidades magnéticas con la fuerza  $F = I m$  y resulta

$$I = \frac{F}{m}$$

De esta ecuación podemos deducir la unidad de la intensidad, substituyendo en su segundo miembro las unidades correspondientes:

$$I = \frac{1 \left[ \frac{\text{gr cm}}{\text{seg}^2} \right]}{1 \left[ \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{seg}} \right]} = 1 \left[ \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{seg}} \right] = 1 [\text{Gauss}].$$

La unidad de la intensidad, 1 Gauss, existe en aquel punto donde el campo magnético actúa sobre una unidad de la masa magnética con la fuerza de 1 [dina].

**161. Experimento:** Colguemos por medio de un hilo muy largo y delgado una varilla magnética liviana de modo que su polo inferior norte esté a la misma altura del polo norte de un imán poderoso colocado en posición vertical.

El polo de la varilla es repelido y se aleja en todos sentidos en dirección radial.

**162. Experimento:** Repitamos el experimento anterior, dando al imán una posición horizontal y acercando el polo norte de la varilla colgada al polo norte del imán en el mismo plano horizontal en que se encuentran los dos polos del imán.

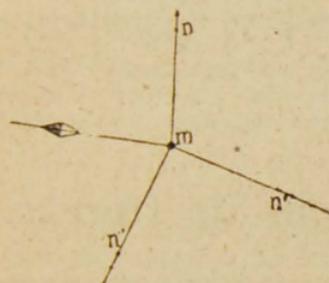


Fig. 114

El polo de la varilla recorre un arco que empieza en el polo norte y termina en el polo sur del imán.

El camino que recorre el polo norte de la varilla se llama línea de fuerza, porque en esa dirección actúa el campo magnético sobre el polo movable. Vemos en el primer caso que las líneas de fuerza son líneas rectas y radiales (fig. 114) y en el segundo arcos cuyas tangentes en los distintos puntos nos dan la dirección de la fuerza.

Si introducimos en el campo magnético el polo sur de la varilla, recorre los mismos caminos, pero en sentido contrario.

La dirección en que se mueve el polo norte la designamos como dirección positiva de las líneas de fuerza.

Si ahora introducimos en el campo magnético en vez de un polo un pequeño imán el polo norte *m* (fig. 114) atrae al polo sur y repele al norte y como estas fuerzas son iguales hacen girar al imán hasta que su eje coincida con la línea de fuerza.

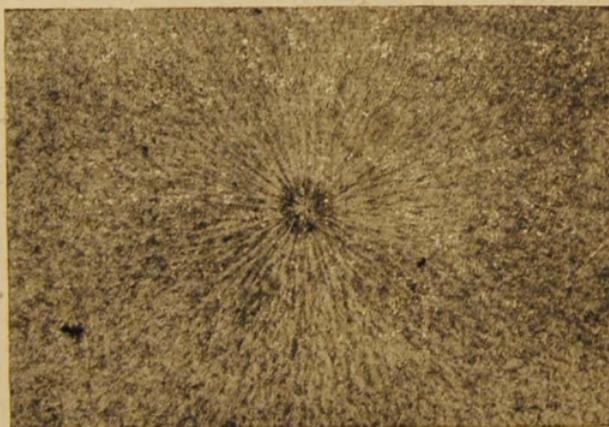


Fig. 115

Si suponemos otro imán cerca del primero, se orienta de la misma manera, y tomando muchos imanes se orientan todos sobre una línea de fuerza.

Esta orientación de los pequeños imanes nos da un método muy sencillo para hacer visibles las líneas de fuerza.

**163. Experimento:** Coloquemos verticalmente un imán poderoso y sobre su extremo un cartón horizontal; espolvoreemos limaduras de hierro y golpeemos ligeramente.

Las limaduras de hierro bajo la influencia del imán se convierten en pequeños imanes que ahora se orientan indicando las líneas de fuerza que son en este caso líneas radiales (fig. 115). A la rotación de los pequeños imanes se opone el roce y para facilitar la orientación de ella conviene golpear el cartón.

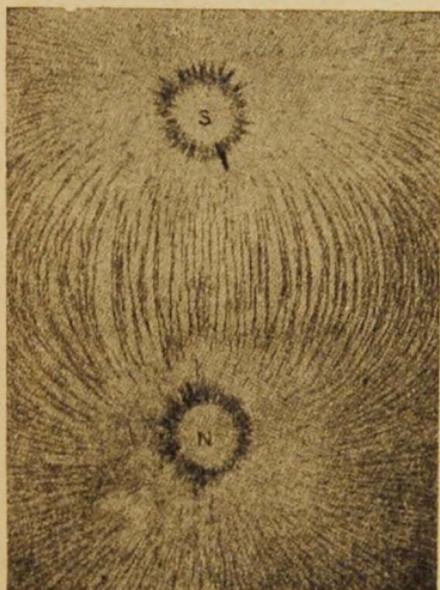


Fig. 116

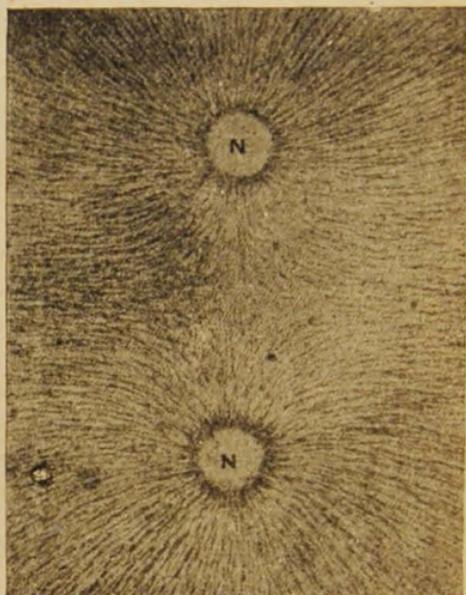


Fig. 117

**164. Experimento:** Repitamos el experimento anterior colocando [el cartón primero sobre dos polos contrarios y después sobre dos iguales.

Las líneas de fuerza son curvas; en el primer caso salen todas del polo norte y van hasta el polo sur (fig. 116) y en el segundo caso salen las líneas de los dos polos, alejándose de ambos (fig. 117).

Vemos que la forma de las líneas de fuerza varía según el número y la naturaleza de los polos.

### Relación entre la intensidad del campo magnético y las líneas de fuerza.

Si colocamos en un punto una unidad de masa magnética, es evidente que de ella salen infinitas líneas de fuerza en todas las di-

recciones posibles; si suponemos una superficie esférica de 1 [cm] de radio alrededor de esa unidad, las infinitas líneas tienen que atravesarla (fig. 118). Ahora para poder expresar la intensidad del campo magnético en cualquier punto por el número de líneas de fuerza, se combinan todas las líneas que pasan por 1 [cm<sup>2</sup>] de la esfera y las reemplazamos por una sola, de modo que de la unidad tienen que salir  $4 \pi$  líneas de fuerza, por tener la esfera de 1 [cm] de radio, una superficie igual a  $4 \pi$  [cm<sup>2</sup>]. Decimos por esto que de **cada unidad de masa magnética salen  $4 \pi$  líneas de fuerza.**

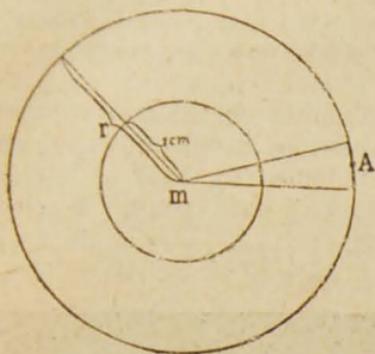


Fig. 118

Si concentramos en el centro  $m$  unidades, de ella saldrán  $4 \pi m$  líneas y si construimos alrededor de esta masa una esfera con el radio  $r$  por toda la superficie  $4 \pi r^2$  [cm<sup>2</sup>] pasan  $4 \pi m$  líneas, y por cada [cm<sup>2</sup>]

$$\frac{4 \pi m}{4 \pi r^2} = \frac{m}{r^2} \text{ [líneas].}$$

Ahora bien, esta cantidad  $\frac{m}{r^2}$ , según la ley de Coulomb, es igual a la fuerza con que actúa el polo  $m$  sobre la unidad de la masa magnética colocada en  $A$  a la distancia  $r$  y que hemos llamado la intensidad del campo magnético del punto  $A$ .

Vemos que el mismo valor  $\frac{m}{r^2}$  representa la intensidad del campo magnético en  $A$  y el número de líneas de fuerza que pasa por el [cm<sup>2</sup>] que se ha puesto en  $A$  normalmente a ellas.

Este resultado podemos generalizarlo diciendo que **en cualquier punto la intensidad del campo magnético es igual al número de líneas de fuerza que pasa por 1 [cm<sup>2</sup>] puesto por este punto normalmente a ellas.** A cada línea corresponde la intensidad de 1 Gauss y si, por ej., por 1 [cm<sup>2</sup>] pasan 150 [líneas], la intensidad en el centro de este [cm<sup>2</sup>] es igual a 150 [Gauss] y la fuerza con que el campo magnético actúa sobre la unidad de la masa magnética colocada en el centro de este [cm<sup>2</sup>] es de 150 [dinas].

Las líneas de fuerza nos dan dos valores muy importantes: primero nos indican en cada punto la dirección de las fuerzas que actúan sobre un polo norte movible, y segundo, nos dan, contando como hemos definido el número de líneas de fuerza, la intensidad en cualquier punto del campo magnético.

## Campo magnético homogéneo.

Se dice que un campo magnético es homogéneo cuando en todos sus puntos la intensidad es la misma.

En tal caso, por cada [cm<sup>2</sup>] de superficie normal a las líneas debe pasar igual número de líneas de fuerza, lo que sucede sólo cuando las líneas son paralelas y equidistantes.

El campo magnético que produce la tierra en una pieza puede considerarse como homogéneo, puesto que, a causa de la gran distancia de sus polos, las líneas son sensiblemente paralelas en este espacio.

### Influencia del hierro dulce sobre la dirección de las líneas de fuerza.

**165. Experimento:** Coloquemos entre dos polos magnéticos poderosos de nombre contrario (mejor tomar los dos polos de un electroimán) una pla-

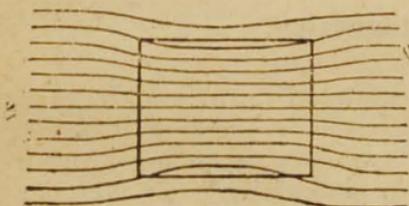


Fig. 119



Fig. 120

ca de hierro dulce y encima de ellos un cartón; espolvoreemos limaduras de hierro y golpeemos ligeramente.

Las líneas de fuerza sufren una desviación; el hierro ejerce una atracción sobre ellas y obliga a las líneas vecinas a pasar por él (fig. 119).

**166. Experimento:** Repitamos el experimento anterior, pero reemplazando la placa de hierro por un anillo del mismo metal.

Casi todas las líneas pasan por el anillo y sólo muy pocas penetran en el interior de él, de modo que este espacio está protegido contra influencias magnéticas de otros polos y una aguja magnética colocada en tal espacio no se orienta por estar eliminado el efecto del magnetismo terrestre. En la fig. 120, que representa el resultado del experimento, se ve bien como las limaduras de hierro dentro del anillo no han experimentado orientación alguna.

## Magnetismo terrestre.

En el primer capítulo ya hemos visto que la tierra ejerce una gran influencia sobre los imanes, haciéndolos tomar, cuando tienen libertad de movimiento, una dirección norte-sur. Para buscar la causa de esta orientación vamos a hacer el

**167. Experimento:** Sobre un imán poderoso y a cierta distancia de él suspendamos una aguja magnética que pueda girar horizontalmente y observemos la posición que toma.

La aguja se coloca paralelamente al imán con su polo norte hacia el sur y el sur hacia el norte del imán, obedeciéndolo de acuerdo con la ley de la atracción y repulsión de los polos.

Por analogía tenemos que suponer que la tierra es un gran imán cuyos polos están cerca de los polos geográficos, y como el polo norte de la aguja se dirige al polo norte geográfico de la tierra, tenemos que suponer situado cerca de éste al polo sur magnético y por la misma razón cerca del polo sur geográfico el polo norte magnético.

La línea que une los polos de un imán se llama su eje magnético y el plano vertical que pasa por el eje magnético de un imán libremente colgado es el meridiano magnético.

### Declinación magnética.

¿Toma la aguja exactamente la dirección norte-sur geográfica, es decir, coincide el meridiano magnético de un lugar (centro de la aguja) con su meridiano geográfico que es el plano que pasa por el lugar (centro de la aguja) y el eje de la tierra?

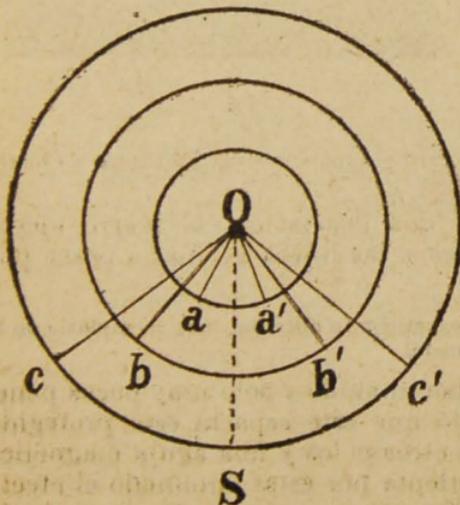


Fig. 121

Para poder contestar a esta pregunta tenemos que conocer el meridiano geográfico que se determina por medio del gnomon.

Se expone al sol una tabla horizontal sobre la cual se han trazado algunas circunferencias concéntricas y en cuyo centro se ha colocado verticalmente una varilla (fig. 121). El sol proyecta sobre la tabla la sombra de la varilla, cuya longitud disminuye a medida que el sol se acerca al meridiano geográfico y

aumenta a medida que se aleja de él. Se marcan antes del mediodía los puntos  $c, b, a$ , y en la tarde los puntos  $a' b' c'$  en que la punta de la sombra toca las 3 circunferencias y se los une con el centro  $O$ . Las bisectrices de los ángulos  $cOc', bOb', aOa'$  coinciden con la meridiana y el plano vertical que pasa por esta línea es el meridiano geográfico.

**168. Experimento:** Tracemos en una mesa la meridiana, coloquemos en un punto de ella un soporte con una aguja magnética (fig. 122) y observemos su posición de equilibrio.

La dirección de la aguja no coincide con el meridiano geográfico sino que forma con él un ángulo  $\delta$ , llamado **declinación magnética**.

El ángulo formado por los meridianos magnético y geográfico de un lugar es su **declinación magnética**, que puede ser oriental u occidental, según que el polo norte de la aguja se desvíe al este o al oeste del meridiano geográfico. En Santiago la declinación magnética es de  $13^\circ 54,2' E$ .

### Determinación *ms* de la declinación magnética.

Para encontrar el ángulo de declinación no se sigue en la práctica el método arriba descrito sino que se emplea un aparato especial, llamado **brújula de declinación** o **declinatorio**; consta de una caja (fig. 123) que puede moverse en un plano horizontal y que lleva al medio una aguja magnética que puede girar también horizontalmente, recorriendo sus extremos un limbo graduado. La caja lleva en uno de sus bordes un anteojo que puede moverse en un plano vertical. El limbo se gradúa de modo que la línea  $0-180^\circ$  quede paralela al eje óptico del anteojo.

La determinación del meridiano geográfico se hace observando el paso de una estrella fija por puntos a igual altura sobre el horizonte, antes y después de su culminación, y trazando la bisectriz del ángulo formado por esas dos direcciones.

Conocido el meridiano geográfico, y después de haber colocado el eje del anteojo en este meridiano, resulta la declinación por el ángulo que forma la aguja con la línea  $0-180^\circ$ .

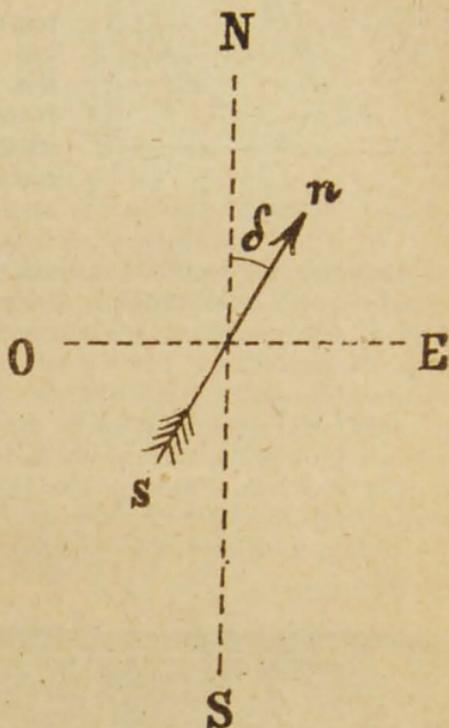


Fig. 122

La experiencia ha hecho ver que la declinación varía para los distintos lugares de la tierra, pero siempre es posible encontrar una serie de puntos con igual declinación.

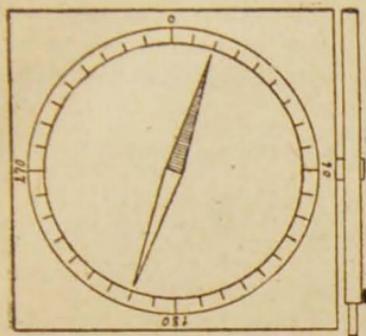


Fig. 123

Las líneas que unen los puntos de igual declinación se llaman líneas isógonas (fig. 124).

La declinación no permanece tampoco constante para el mismo lugar sino que se observan **variaciones regulares** y lentas y otras en forma anormal y rápida, **variaciones irregulares o perturbaciones**. Las variaciones regulares son periódicas y se dividen en diurnas, anuales y seculares.

La aguja de declinación hace una oscilación cada día. Durante la noche queda casi inmóvil; desde la salida del sol el polo norte se dirige al este y alcanza su máximo a las cinco de la tarde y en seguida vuelve hacia el oeste hasta las diez de la noche. El ángulo comprendido entre las posiciones oriental y occidental, no es igual en todas las épocas del año, es mayor en verano que en invierno. En las regiones situadas al norte del ecuador, el polo norte se mueve primero hacia el oeste y vuelve hacia el este y las amplitudes de estas oscilaciones son mayores en las regiones polares y disminuyen a medida que se acerca al ecuador magnético que definiremos más adelante.

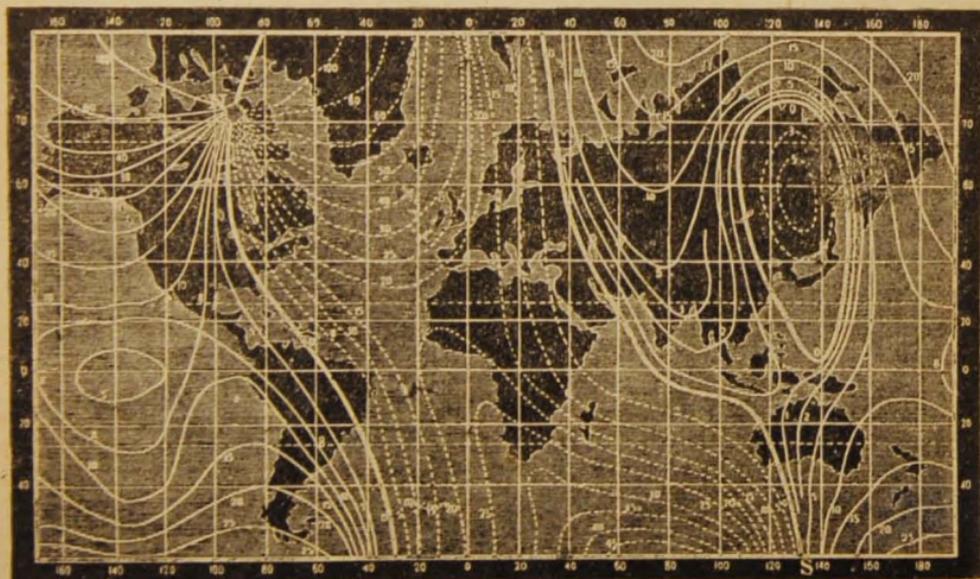


Fig. 124

Fuera de estas variaciones hay otras que se efectúan durante cierto número de años, como muestran los siguientes datos que se refieren a la declinación magnética de

París		Valparaíso	
1580	11° 30' E	1709	9° 30' E
1663	0° 0' »	1744	12° 30' »
1780	19° 15' O	1802	14° 55' »
1814	22° 34' »	1866	15° 51' »
1874	17° 30' »	1883	15° 15' »
1910	14° 6' »	1913	14° 2' »

Estas variaciones seculares hacen necesaria de tiempo en tiempo la determinación de la declinación de los lugares más importantes de la tierra y por este motivo se han creado observatorios magnéticos que se hacen cargo de tales observaciones.

Las perturbaciones son desviaciones momentáneas y no se verifican en épocas determinadas, siendo producidas por erupciones volcánicas, tempestades, temblores u auroras polares; las agujas oscilan entonces considerablemente.

### Brújula marina o compás marino.

La aplicación más importante de la propiedad de las agujas magnéticas de colocarse siempre en una dirección bien determinada es la **brújula marina** (fig. 125).

Esta permite a los navegantes, en combinación con los mapas que contienen las líneas isógonas, seguir el rumbo que les conviene al través de los mares, orientándose aun cuando no haya tierra visible en punto alguno del horizonte.

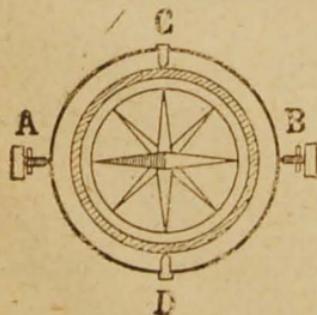


Fig. 126



Fig. 125

La aguja debe mantenerse siempre

horizontal, a pesar de los múltiples movimientos del barco, lo que se consigue empleando la **suspensión de Cardani** (fig. 126). Consta de un soporte con dos quicios *A* y *B* colocados en los extremos de uno de sus diámetros y que permite girar en torno de ellos a otro anillo, que a su vez lleva los quicios *C* y *D* colocados en los extre-

mos de un diámetro perpendicular al anterior; en dichos quicios *C* y *D* está sostenido un tercer anillo que lleva la caja que contiene la aguja y que debe encontrarse en posición de equilibrio estable; es evidente que esta caja se mantiene horizontal cualquiera que sea la posición del sostén.

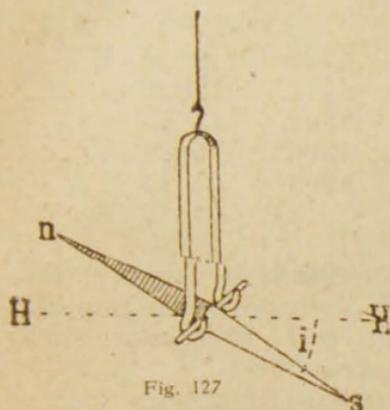


Fig. 127

La aguja lleva sobrepuesto un disco de cartón en el que se ha dibujado la rosa de los vientos, coincidiendo sus puntos norte y sur con los polos de la aguja. La caja tiene marcado un punto y el compás está colocado en la cubierta de la nave, de tal modo que ésta siga la dirección norte si el polo norte de la aguja coincide con el punto marcado. Pero esta dirección no es la dirección norte geográfica, hay que conocer la declinación del lugar en que se encuentra y que está determinada en las cartas por las líneas isógonas y háy que girar la nave en este ángulo de declinación para darle la dirección norte geográfica; sea, por ej., la declinación de un lugar  $15^{\circ}$  E, entonces hay que girar la nave en este ángulo hacia el oeste.

La aguja se coloca primero con su eje en el meridiano magnético, formando éste el mismo ángulo  $\delta$  con el meridiano geográfico, pero al mismo tiempo se inclina formando su eje un ángulo con el horizonte llamado inclinación magnética.

### Inclinación magnética.

**169. Experimento:** Colguemos una aguja magnética, que puede moverse libremente (fig. 127) con su centro sobre la meridiana del experimento 168 y observemos la posición que toma.

La aguja se coloca primero con su eje en el meridiano magnético, formando éste el mismo ángulo  $\delta$  con el meridiano geográfico, pero al mismo tiempo se inclina formando su eje un ángulo con el horizonte llamado inclinación magnética.

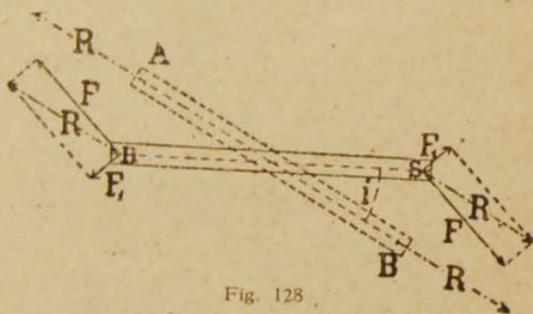


Fig. 128

La inclinación magnética es el ángulo formado por el horizonte y el eje de un imán colocado en el meridiano magnético y que puede girar libremente en un plano vertical.

**170. Experimento:** Examinemos la naturaleza del polo que está bajo el horizonte.

El polo sur de la aguja queda bajo el horizonte, lo que es na-

tural, puesto que estamos en el hemisferio sur más cerca del polo norte magnético de la tierra que ejerce la fuerza atractiva  $F$  sobre el polo sur (fig. 128) y la misma  $F$  repulsiva sobre el norte del imán (estas fuerzas pueden considerarse iguales y paralelas debido a que el largo de la aguja es insignificante con respecto a la gran distancia que hay entre el polo magnético terrestre y la aguja), mayores que las  $F_1$  del polo sur magnético de la tierra sobre  $n$  y  $s$  en sentido inverso. Las fuerzas  $F$  y  $F_1$  dan la resultante  $R$  y bajo la influencia de la pareja  $R$  el imán toma la posición de  $AB$ . En el hemisferio norte sucede todo lo contrario y el polo norte está bajo el horizonte. Vemos que el magnetismo terrestre nunca puede mover un imán hacia uno de sus polos sino que produce únicamente un movimiento giratorio.

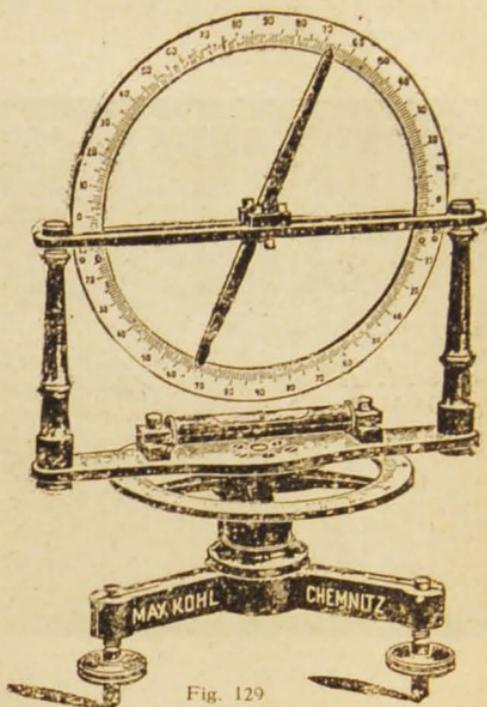


Fig. 129

### Determinación de la inclinación.

Para determinarla se usa la brújula de inclinación o inclinómetro (fig. 129), que consta de un círculo vertical graduado con una aguja que puede moverse en su mismo plano y que gira a su vez alrededor de un eje vertical sobre un limbo horizontal graduado.

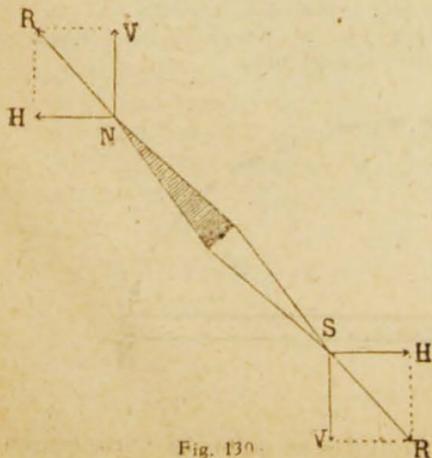


Fig. 130

Sabemos que para medir la inclinación la aguja debe girar en el plano del meridiano magnético; éste se determina haciendo girar el plano vertical hasta que la aguja se coloque perfectamente vertical; en tal caso está en un plano perpendicular al del meridiano y basta hacerlo girar exactamente en  $90^\circ$  y leer el ángulo formado por la aguja con la horizontal.

Para mostrar que en verdad la aguja toma una posición vertical en un plano perpendicular al meridiano magnético, consideramos la fig. 130. Sobre los polos  $N$  y  $S$  actúa el magnetismo terrestre con la misma fuerza  $R$ , que podemos descomponer en una componente horizontal  $H$  y otra vertical  $V$ , situadas sobre el plano del meridiano magnético. Estas componentes actúan con

todo su valor cuando la aguja coincide con el meridiano magnético, pero si giramos el círculo en  $90^\circ$  las componentes horizontales se anulan por la resistencia del eje de la aguja y restan solamente las componentes verticales que colocan la aguja en posición vertical.

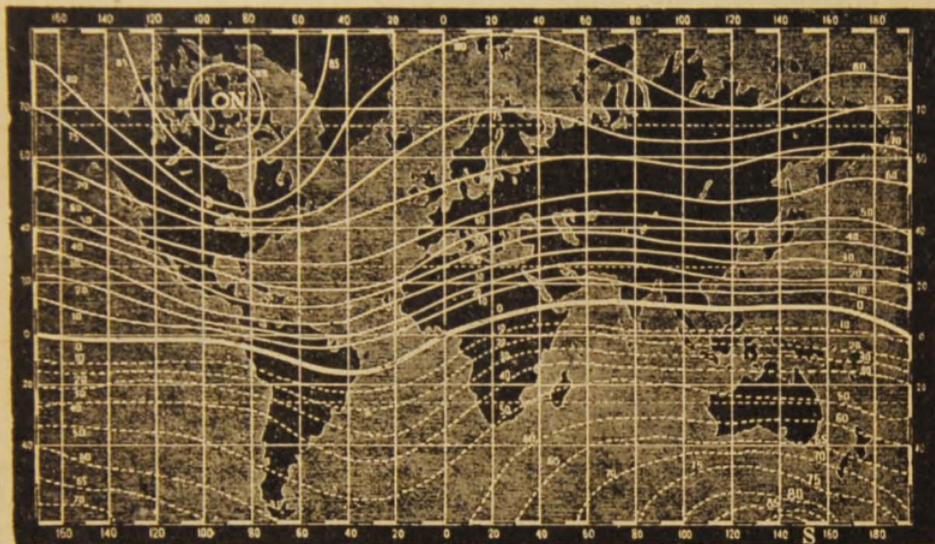


Fig. 131

La experiencia ha hecho ver que la inclinación magnética varía para los distintos lugares de la tierra, pero siempre es posible encontrar una serie de puntos con igual inclinación.

Las líneas que unen los puntos de igual inclinación magnética se llaman líneas isóclinas (fig. 131).

Para ver cómo varía la inclinación en los distintos puntos de la tierra vamos a hacer el

**171. Experimento:** Sostengamos a cierta altura sobre un imán *SN* (fig. 132) una aguja magnética, que puede girar libremente tal como la de fig. 127, y movámosla del polo *N* al polo *S*, siguiendo la dirección del imán.

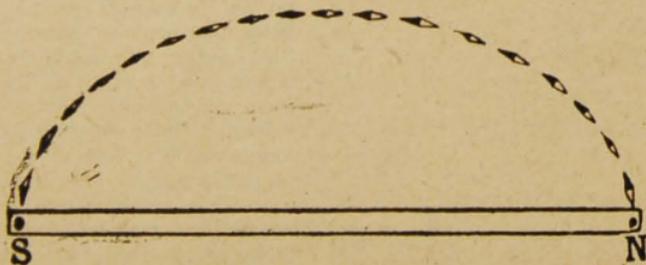


Fig. 132

Sobre el polo norte del imán la aguja se colocará verticalmente con su polo sur hacia abajo; si la alejamos hacia el polo sur su ángulo

lo con la horizontal se hace menor, pero el polo sur continúa hacia abajo hasta llegar a la zona neutra en la que se coloca horizontalmente; más allá el polo norte baja hasta llegar a colocarse verticalmente sobre el polo sur.

Lo mismo se ha observado en la tierra. Hay puntos cerca del ecuador geográfico de inclinación magnética  $0^\circ$  (aguja horizontal); la línea que une dichos puntos es el **ecuador magnético** que no es un círculo máximo sino que corta en dos puntos al geográfico (fig. 131); a medida que nos alejamos del ecuador magnético la inclinación crece hasta  $90^\circ$ . Aquellos puntos en que la inclinación tiene este valor (aguja vertical) son los **polos magnéticos**. Se ha encontrado en el hemisferio norte el polo sur magnético en la latitud de  $70^\circ 30' N$  y longitud  $97^\circ 40' O$  de Greenwich, en la península de Boothia Félix; el polo norte magnético en el hemisferio sur en la tierra Victoria Meridional, en la latitud de  $72^\circ 25' S$  y longitud  $155^\circ 16' E$  de Greenwich.

La inclinación está sometida también a variaciones periódicas y a perturbaciones, que no han sido tan estudiadas como las de la declinación por carecer de importancia.

La inclinación de Santiago es de  $30^\circ 31'$ , la de Arica de  $9^\circ 23'$  y la de Puerto Montt de  $40^\circ 34'$ .

## Intensidad del magnetismo terrestre.

Además de la declinación e inclinación, que sólo nos indican la dirección en que se coloca un imán bajo la influencia del magnetismo terrestre, tenemos que determinar el valor de la intensidad de éste.

**La intensidad del magnetismo terrestre en cierto punto nos indica el valor de la fuerza con que él actúa sobre la unidad de la masa magnética colocada en ese punto y la medimos en Gauss.**

La intensidad actúa siempre en la dirección de la aguja de inclinación, y sus valores no alcanzan a 1 [Gauss], es decir, que el magnetismo terrestre actúa sobre la unidad de la masa magnética con una fuerza menor que 1 [dina]. Hay puntos de la tierra de igual intensidad y las líneas que los unen se llaman **líneas isodinámicas**; en Santiago la intensidad es de 0,37 [Gauss].

### Agujas astáticas.

En algunos instrumentos se necesitan agujas magnéticas que no obedezcan tanto al magnetismo terrestre y en tal caso se colocan dos agujas magnéticas con sus polos invertidos sobre una misma armadura (fig. 133). Si los polos de los dos imanes tuvieran

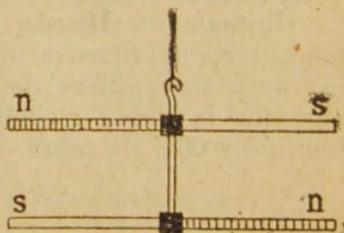


Fig. 133

igual masa magnética, la atracción del polo magnético norte terrestre sobre un polo sur sería igual a la repulsión del mismo polo terrestre sobre el norte del mismo lado; la acción del polo sur terrestre sería igualmente nula.

Dos agujas así combinadas quedarían en equilibrio en cualquier posición y se llaman **agujas astáticas**. Pero para los instrumentos no nos sirven tales agujas astáticas ideales, sino que forzosamente deben estar sujetas a una pequeña influencia del magnetismo terrestre como veremos más adelante, y esto lo conseguiremos haciendo desiguales los polos y mientras menor es la diferencia entre sus masas magnéticas de los polos, menor resulta la influencia del magnetismo terrestre.

## Cuerpos para- y dia- magnéticos.

Hasta ahora sólo hemos estudiado las propiedades magnéticas del hierro sin averiguar si algunas otras substancias también las poseen.

**Faraday** comprobó que con imanes bastante poderosos pueden imanarse todos los cuerpos y que hay que dividirlos en dos clases según la manera cómo se imanán. Si se acerca un cuerpo de la primera clase a un polo magnético, se forma en el extremo más próximo un polo contrario que es atraído. Tales cuerpos se llaman cuerpos **paramagnéticos** y a esta clase pertenecen el hierro, níquel, cobalto, manganeso, cromo, disoluciones de sales de hierro y el oxígeno.

Si se acerca un cuerpo de la segunda clase, se forma en el extremo que está más cerca un polo del mismo nombre que es repelido. Tales cuerpos se llaman cuerpos **diamagnéticos** y a ellos pertenecen el bismuto, antimonio, zinc, estaño, mercurio, agua, alcohol.

Una varilla paramagnética colocada entre dos polos contrarios se orienta de modo que su eje coincide con la línea que los une, mientras que una varilla diamagnética tiene que tomar una dirección perpendicular a ella. Para estudiar las propiedades magnéticas de los líquidos y gases se les encierra en delgados tubos de vidrio que se colocan entre los polos.

Ultimamente **Heusler** descubrió propiedades magnéticas casi iguales a las del hierro en algunas aleaciones cuyos componentes son muy poco susceptibles de imanación; encontró por ejemplo muy magnética la aleación compuesta de 27% de manganeso, 13% de aluminio y 60% de cobre.

### Preguntas.

- 1) ¿Cómo podemos saber si una varilla de acero es un imán o no?
- 2) ¿Por qué se usa acero y no fierro dulce para la fabricación de imanes permanentes?

- 3) ¿De qué manera podemos separar fácilmente pedazos de fierro de los de otros metales?
- 4) ¿Tienen las barras de fierro de una reja propiedades magnéticas? ¿Cuál es su polaridad?
- 5) Disponiendo únicamente de dos varillas de las cuales una es de fierro dulce y la otra un imán. ¿Cómo podemos saber, cuál de las dos es el imán?
- 6) ¿Cuál es la fuerza que obliga a una aguja magnética, colocada sobre un eje vertical, a volver al meridiano magnético?
- 7) ¿Cuál es la fuerza que orienta la aguja de inclinación en el meridiano magnético?
- 8) ¿Por qué no se puede hacer la caja de la brújula marina de fierro?
- 9) ¿Cuáles son los puntos de la tierra en los cuales la aguja magnética se dirige exactamente hacia el norte geográfico? (Véase fig. 124).
- 10) ¿Cómo se mueve una aguja de inclinación en un viaje de Lisboa a Buenos Aires? (Véase fig. 131).

### Problemas.

- 1) ¿Qué fuerza ejerce un polo de 10 unidades sobre otro de 5 unidades situado a 20 [cm] del primero?
- 2) ¿Qué masa magnética tiene un polo que sobre otro igual a la distancia de 1 [cm] actúa con la fuerza de 1 [gr-peso]?
- 3) ¿Con qué fuerza actúa un imán, cuyos polos poseen la masa de 60 unidades, siendo la distancia entre ellos de 24 [cm], sobre otro polo de 30 unidades, que se encuentra en la prolongación del eje del imán a una distancia de 50 [cm] del centro del imán?
- 4) Un imán cuyo momento magnético es  $80 \left[ \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{seg}} \right]$  actúa sobre una aguja magnética cuyo centro se encuentra a la distancia de 40 [cm] del centro del imán. ¿Cuál es la posición de equilibrio de la aguja, si la componente horizontal del lugar es de 0,26 [Gauss]?
- 5) ¿Cuál es la intensidad del magnetismo terrestre de un lugar, cuya inclinación es de  $38^\circ$  y cuya componente horizontal es de 0,28 [Gauss]?
- 6) ¿Qué ángulo forma una aguja de inclinación, si el plano en que se mueve forma un ángulo de  $30^\circ$  con el meridiano magnético, siendo el ángulo de inclinación del lugar de  $42^\circ$ ?
- 7) ¿Cuál es la inclinación del lugar, si la aguja de inclinación en dos planos perpendiculares entre sí y a lados distintos del meridiano magnético forma con el horizonte los ángulos  $\alpha = 71^\circ 20'$  y  $\beta = 75^\circ 50'$ ?
- 8) Un imán que puede oscilar en torno de un eje vertical que pasa por su centro efectúa 90 oscilaciones en 240 [seg]. La componente horizontal del lugar sea de 0,2 [Gauss] y el momento de inercia del imán de 320 [gr-cm<sup>2</sup>]. ¿Cuál es el momento magnético del imán?
- 9) Un polo magnético posee 25 unidades. ¿Cuántas líneas de fuerza que parten de su masa  $m$ , pasan por 1 [cm<sup>2</sup>] a la distancia de 40 [cm]?
- 10) Un campo magnético homogéneo tiene una intensidad de 2,5 [Gauss]. ¿Cuántas líneas de fuerza pasan por 1 [m<sup>2</sup>] colocado normalmente a las líneas?
- 11) En un punto  $A$  de la tierra, donde la componente horizontal es de 0,24 [Gauss], una aguja de declinación efectúa 40 oscilaciones por min. ¿Cuál es el valor de la componente horizontal  $H_2$  en  $B$ , donde la aguja efectúa 60 oscilaciones por min?
- 12) Un imán efectúa en un plano horizontal 30 oscilaciones por minuto. Después de haberlo imanado nuevamente efectúa 40 oscilaciones por min. ¿Cuántas veces mayor es la masa magnética de los polos en el segundo caso que en el primero?

### Ejercicios prácticos.

- 1) Determinar la declinación magnética por medio del gnomon.
- 2) Determinar la declinación magnética por medio del declinatorio.
- 3) Determinar la inclinación magnética por medio del inclinatorio.
- 4) Determinar la componente horizontal y la intensidad del magnetismo terrestre.
- 5) Determinar el momento magnético de un imán.
- 6) Buscar con una aguja de declinación las direcciones N, S-O y N-E.



$$S = \frac{\pi r^2}{4} - \pi x^2$$

$$S = \frac{\pi (2r - 2x)^2}{4} - \pi x^2$$

$$S = \frac{\pi (4r^2 - 8rx + 4x^2)}{4} - \pi x^2$$

$$S = \frac{\pi (4r^2 - 8rx + 4x^2 - 4x^2)}{4}$$

$$S = \frac{\pi (4r^2 - 8rx)}{4} = \pi r^2 - 2\pi rx$$

$$-2\pi r x^2 - 2\pi^2$$

$$S = \frac{\pi (4r^2 - 8rx - 8 - 4)}{4}$$

$$x^2 + 2x - 2 = 0$$

$$S = \frac{\pi (8r^2 - 12)}{4}$$

$$x = \frac{-2 \pm \sqrt{4 + 8}}{2}$$

$$S = \frac{\pi (8\sqrt{2} - 12)}{4}$$

$$x = \frac{-2 + 2\sqrt{2}}{2}$$

$$x = -2 - 2\sqrt{2}$$

$$2r^2 - 2r\sqrt{2} + r^2$$





410



