RAMON G. LOYARTE ELEMENTOS DE FÍSICA

TOWN

Editorial ESTRADA

ELEMENTOS

DE

FÍSICA

TOMO II

DONACION OMAR GARDET Y FAMILIA

OMAR GARDER

And so

ELEMENTOS

DE

FÍSICA

POR EL DOCTOR

RAMÓN G. LOYARTE

Ex inspector de Enseñanza Secundaria de la Nación.

Ex presidente de la Universidad Nacional de La Plata. Director del Instituto de Física y Profesor de Física General y Matemática de la Universidad.

Miembro titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Buenos Aires. Académico correspondiente de la Academia de Ciencias de Lima.

Primer premio Nacional en Ciencias. Grupo de Física, Matemáticas y Química. Años 1933-37.

(1) · 大学版图(1)

TOMO II

Responden especialmente al programa de las Escuelas Normales



ANGEL ESTRADA y Cía. S. A. - Editores 466 - Bolívar - 466 * Buenos Aires 1 9 4 0

> BIBLIOTECA NACIONAL DE MAESTROS

Régimen Legal de la Propiedad Intelectual. Ley 11.723.

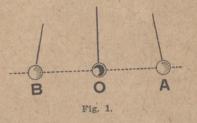
CAPITULO I

MOVIMIENTO OSCILATORIO. EL SONIDO

1. Movimiento oscilatorio. Amplitud, período y frecuencia.

— Ya vimos que si a una pequeña masa, una esferilla,
p. ejem., suspendida de un hilo delgado (fig. 1), se la

desvía de su posición de reposo y se la abandona luego,
cumple, bajo la acción de la
gravedad un movimiento que
se llama oscilatorio o vibratorio porque el sentido del
movimiento del cuerpo cambia periódicamente, movién-

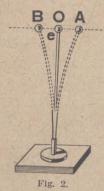


dose entre dos posiciones extremas A y B situadas simétricamente con respecto a la posición de reposo O, a uno y otro lado. Durante cierto tiempo se mueve de A hacia B y luego durante un tiempo igual de B hacia A. En las posiciones extremas A y B la velocidad de la esferilla es nula mientras que en O la velocidad es máxima.

Si no existiese ninguna causa de pérdida de energía la esferilla se movería indefinidamente de A hacia B y de B hacia A, sucesivamente, pasando por todos los puntos, a intervalos iguales de tiempo con igual velocidad, una vez en un sentido y otra en sentido opuesto.

Lo mismo sucede con la esferilla *e* fija en el extremo de la varilla metálica de la fig. 2. Si flexionando la varilla se la lleva de la posición de reposo a la *A* y allí se la suelta, la esferilla *oscila*.

Bajo la acción de fuerzas elásticas se mueve hacia O y llega hasta una posición extrema B; de allí vuelve hacia



atrás alcanzando otra vez, si no hay pérdidas de energía, la posición inicial A. El proceso se repite periódicamente. Se llama amplitud del movimiento oscilatorio de una masa al apartamiento o elongación máxima de su posición de reposo. La amplitud de las oscilaciones del péndulo o de la esferilla es, pues, OA = OB.

Se denomina período o tiempo de una oscilación doble al tiempo transcurrido entre dos pasajes de la esferilla por la posición de reposo en el mismo sentido,

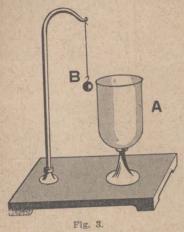
es decir, al tiempo empleado en pasar de O a B, de B a A y de aquí hasta O. El período es igual, también, al tiempo que tarda la masa en pasar de A hasta B, p. ejem., y en volver de B a A. La mitad de este tiempo es el tiempo de una oscilación simple.

Se llama frecuencia, al número de oscilaciones dobles por segundo. Es evidente que si T es el período, es decir, el tiempo que tarda en cumplirse una oscilación y n es la frecuencia, esto es el número de oscilaciones que se cumplen en 1 segundo, se tiene que

$$T \cdot n = 1.$$

2. Naturaleza del sonido. — Se designa con el nombre de sonido tanto a la sensación que se recibe por el oído como a la causa externa que la determina. El sonido se origina en cuerpos oscilantes. Consiste en un movimiento

vibratorio excitado en un cuerpo que se transmite hasta el oído a través de medios elásticos ponderables, como



el aire, el agua, etc.

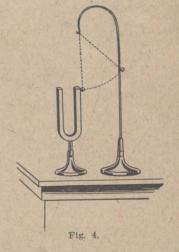
Un vaso al que se le ha dado un golpe con la punta del dedo emite un sonido: sus vibraciones no se observan a simple vista, pero pueden ponerse en evidencia acercando a sus bordes (figura 3), la masa de un pequeño péndulo; mientras perdure el sonido será arrojada en dirección radial.

Se ve oscilar un diapasón (fig. 4), o una cuerda al mis-

mo tiempo que se percibe un sonido que cesa tan pronto como el movimiento de esos cuerpos se extingue. Las vibraciones del diapasón pueden, por otra parte, registrarse fácilmente: es suficiente adaptar a uno de sus extremos una delgada punta de acero que se hace apoyar suavemente sobre la superficie ahumada de una lámina metálica (fig. 5). Si ésta se desplaza, mientras el diapasón vibra, queda una huella que revela la naturaleza de aquél.

Que la propagación del sonido requiere la presencia de un

medio ponderable, puede demostrarse por la experiencia siguiente: si se suspende en el interior de un balón, de un



hilo delgado, una campanilla (fig. 6), el sonido se hace más y más débil a medida que se extrae el aire, hasta que para un vacío elevado no se le percibe.



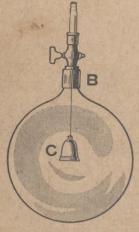


Fig. 6.

de que tal ocurre a través de las paredes de vidrio del balón de la fig. 6. Muy ilustrativo es el siguiente experimento:

Si se sitúa un reloj en una caja abierta sobre la me-

Si se deja entrar en el balón vacío un gas cualquiera, o algunas gotas de un líquido, inmediatamente se propagan al exterior las vibraciones de la campanilla. Lo mismo sucede si se llena con un líquido.

Estos experimentos pueden efectuarse también con una campanilla eléctrica situada dentro de la campana de una máquina neumática.

Oue el sonido se propaga a través de los sólidos lo prueba el hecho



sa, envuelto en algodón (fig. 7), y nos situamos a una distancia a la cual no se le percibe, si se le toca con uno de los extremos de una barra metálica y llevamos el otro al oído, oiremos nítidamente su tic-tac.

Se pueden mencionar, también, los hechos conocidos de que debajo del agua se perciben los sonidos producidos



P 15. O.

fuera y de que la marcha lejana de una cabalgadura se percibe nítidamente arrimando el oído al suelo (fig. 8).

El conocido pasatiempo de los niños que enseña la fig. 9, se funda en el mismo hecho acústico.

3. Los tres caracteres del sonido. — Los tres caracteres

del sonido son la intensidad, la altura y el timbre.

A. Intensidad.

— Al comparar subjetivamente dos sonidos, decimos que uno es más o menos fuerte que el otro, o, en un lenguaje menos vulgar, que uno es más o me-



Fig. 9.

nos intenso que el otro.

La experiencia enseña que el sonido es tanto más intenso cuanto mayor es la amplitud de las vibraciones del cuerpo que lo produce. Esto es muy fácil de comprobar con una cuerda, con un diapasón o, simplemente, con un vaso, mediante el experimento de la figura 3.

B. ALTURA. — Hablamos también de sonidos graves y agudos. El sonido de la bordona de una guitarra, por ejem., es mucho más grave que el de la prima. Los músicos hablan de sonidos más o menos altos. La altura de un sonido depende de la frecuencia de las vibraciones, es decir, del número de oscilaciones por segundo. Tomando dos diapasones de frecuencias diferentes, se comprobará que

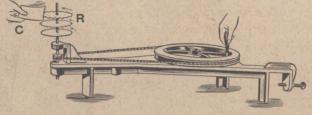


Fig. 10.

el sonido de mayor altura corresponde al diapasón de mayor frecuencia. Igual comprobación puede efectuarse mediante la rueda dentada de Savart (fig. 10). En ella el sonido es producido por la sucesión de choques de los dientes de una de las tres ruedas R dentadas, que giran con cierta velocidad, contra el borde de un trozo G de cartulina. Para igual velocidad angular el número de choques por segundo que recibe la cartulina es tanto mayor cuanto mayor es el número de dientes, y el sonido es tanto más agudo. Esto se hace notorio haciendo apoyar la cartulina en rápida sucesión sobre las tres ruedas.

Igual comprobación puede realizarse con la sirena de Cagniard de Latour, que permite, además, determinar por comparación la altura de un sonido. Un disco D (fig. 11), provisto de orificios, es puesto en giración por una corriente de aire que se escapa a través de orificios practica-

dos en un disco fijo C, paralelo y muy próximo al móvil. Ambos discos tienen igual número de aberturas y están dispuestos de modo que si uno coincide, coinciden todos los demás. Las perforaciones están inclinadas entre sí de

suerte que, cuando se enfrentan, la corriente de aire, debiendo cambiar de dirección, comunica al disco móvil D cierto impulso rotativo. Cada vez que un agujero móvil enfrenta uno de los fijos, el aire exterior recibe un impulso en ese lugar. La altura del sonido que se genera será igual al producto del número N de revoluciones por segundo por el número n de agujeros. Como las coincidencias se producen simultáneamente en todos los agujeros, los sonidos de iqual altura que se generan sobre las aberturas fijas se refuerzan. El número de agujeros del disco fijo permite, entonces, aumentar la fuerza motriz al mismo tiempo que la intensidad del sonido.

La sirena lleva un dispositivo que consiste en un tornillo sin fin A que acciona dos ruedas dentadas R y R', mediante las cuales se conoce el número N de revoluciones por segundo que da en un instante dado el disco móvil

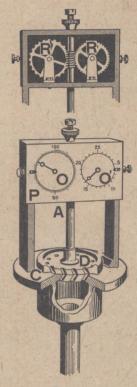


Fig. 11.

D. Cuanto mayor es el número de vueltas más alto es el sonido que se percibe.

C. Timere. — El oído percibe en sonidos de igual intensidad y altura, sobre todo si provienen de cuerpos en condiciones diferentes, como por ejem., las cuerdas de un piano y de un violín, ciertas diferen-

cias que designan con el nombre de diferencias de tono o de timbre.

La causa de esto es que la vibración principal va acompañada de otras vibraciones que provienen del aire encerrado en la caja del instrumento, de la caja misma, etc.

El tono o timbre de un sonido dependen, entonces de las vibraciones secundarias que acompañan a la vibración fundamental.

4. Límites de los sonidos perceptibles. — La experiencia enseña que para que un movimiento vibratorio que llega hasta el oído produzca una sensación sonora, debe tener una frecuencia comprendida dentro de ciertos límites que varían de un ser a otro. Así, por ejemplo, existen muchas personas que no perciben los agudos estridentes del grillo ni el piar de los gorriones.

Los distintos experimentadores han obtenido límites bastante diferentes. La dificultad reside en que no es fácil la producción de sonidos bien *puros*, esto es, desprovistos de armónicas; ha ocurrido que cuando el observador creía percibir el sonido de menor frecuencia o fundamental, percibía, en realidad, uno de los que forman su cortejo.

Savart ha deducido, de experiencias que realizara con su rueda dentada, para el límite superior, el valor de 24.000 oscilaciones por segundo.

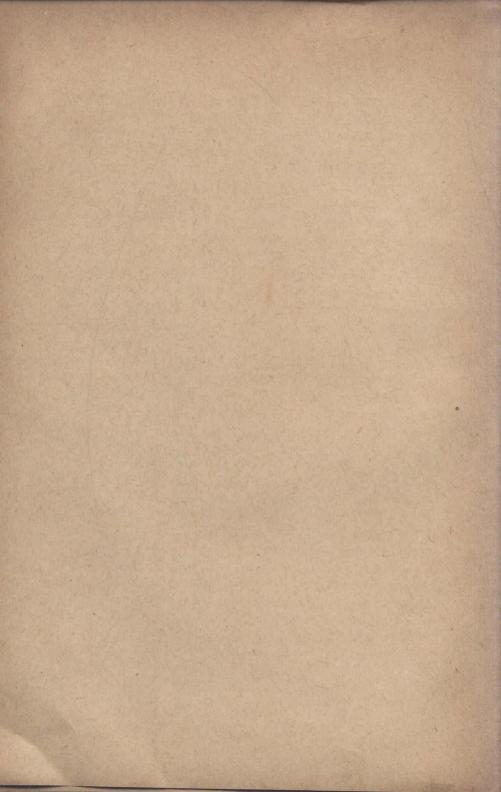
Despretz, utilizando diapasones construídos por Marlove, encontró el valor de 36.864, y Appun 40.960. Koenig ha encontrado, en cambio, utilizando las vibraciones longitudinales de las barras, el valor 16.384. Este último no halló persona alguna que pudiese percibir el movimiento ondulatorio producido por una barra que vibraba con la frecuencia 24.576.

Los diapasones y barras ofrecen el grave inconveniente de que oscilan, a la vez, longitudinal y transversalmente. Determinaciones relativamente modernas efectuadas con el pito ideado por Galton, que produce vibraciones de una frecuencia hasta de 50.000, enseñan que el límite superior es muy próximo a 16.000. Las ventajas del empleo de esta fuente de sonido consiste en que se pueden producir sonidos muy intensos, constantes y bastante puros.

En las medidas llevadas a cabo con ese pito, la frecuencia se ha medido objetivamente, produciendo ondas estacionarias en el tubo de Kundt. Se revelaba así la existencia de un intenso movimiento ondulatorio, cuando

el oído no percibía absolutamente nada.

El límite inferior corresponde a una frecuencia que va de 16 a 20 oscilaciones por segundo.



CAPÍTULO II

PROPAGACIÓN DEL MOVIMIENTO OSCILATORIO. ONDAS

1. Generalidades. — La experiencia enseña que si en una porción cualquiera de una masa gaseosa, líquida o sólida se produce un movimiento vibratorio, ese movimiento se transmite con cierta velocidad a todos los elementos de la masa. La vibración de una campana se propaga a través del aire en todas direcciones. Un movimiento de las masas rocosas en el seno de la tierra se propaga hasta los lugares más remotos con intensidad decreciente. Lo mismo ocurre

con explosiones o vibraciones producidas en el seno del agua.

Supongamos que en un punto *O* (fig. 12), de una gran masa de aire, de agua o de una substancia sólida que tiene idénticas propiedades en todos los lugares y direcciones (1), se produce un movimiento oscilatorio. Transcurrido cierto tiempo comenzarán a

E, E₂
O r₂

vibrar todos los puntos de la superficie E_1 de radio r_1 y más tarde todos los puntos de la esfera E_2 de radio r_2 y así siguiendo. De un movimiento que se propaga así se dice que se propaga por ondas, por lo que se llama ondulatorio. La onda en un instante dado alcanza todos los puntos de E_1 , luego los de E_2 , etc. Las superficies como E_1 y E_2 cuyos

⁽¹⁾ Esta aclaración es importante, pues los cristales, p. ejem., son homogéneos pero sus propiedades dependen de la dirección. Conducen, p. ejem., el calor mejor en una dirección que en otra.

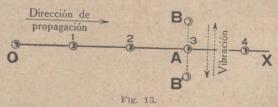
puntos comienzan todos a vibrar al mismo tiempo se llaman superficies de onda.

Si O sigue vibrando seguirán vibrando también todos los puntos de las superficies E_1 , E_2 , etc., porque el movimiento de aquél (de O), se seguirá propagando.

Para hacer notorias otras propiedades de este movimiento consideraremos lo que sucede en una cualesquiera de las direcciones y, además, los dos tipos de *ondas* que se producen.

2. Ondas longitudinales y transversales. — La experiencia enseña que el movimiento oscilatorio se propaga de dos maneras: en una, las masas oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación; en la otra, las masas oscilan

en la misma dirección en que se propaga el movimiento. En las figs. 13 y 14 O es la masa en la que se pro-

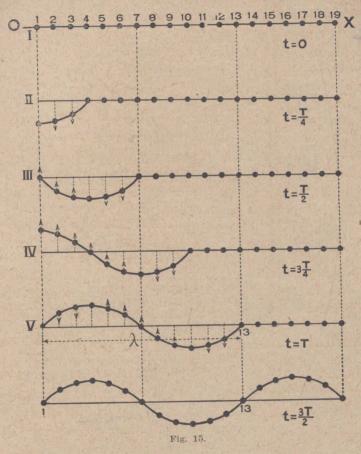


duce originariamente el movimiento vibratorio y 1, 2, 3, 4, son elementos de masas aislados con el pensamiento del medio continuo situados sobre una de las direcciones OX en que se propaga el movimiento. En el primer caso



luego vuelve de *B* hacia *B'* y de *B'* hacia *A* y así sucesivamente. En el segundo las oscilaciones son *longitudinales* porque todos los puntos vibran como el 3 ó *A* (fig. 14), sobre la dirección *OX*.

3. Otros caracteres del movimiento: longitud de onda. — Veamos ahora lo que sucede mientras el centro O de vibración cumple una oscilación completa. Consideremos primeramente el caso en que las oscilaciones son trans-



versales. Tengamos un medio continuo y aislemos con el pensamiento cierto número de elementos de igual masa, equidistantes, situados sobre cierta dirección OX. En la fig. 15 están representados por puntos. La distancia entre

éstos ha sido elegida de tal modo que el tiempo que tarda en propagarse el movimiento oscilatorio de uno a otro es igual a la doceava parte del tiempo T de una oscilación, tiempo que, según ya sabemos, se llama período.

Suponemos que todos los puntos tienen igual período. Si el punto O, que es el 1, comienza a oscilar en un instante dado, transcurrido un tiempo igual a $^1/_{12}$ T comenzará a oscilar el número 2, a los $^2/_{12}$ T el 3, a los $^3/_{12}$ T el 4 y así siguiendo.

En la fig. 15 se han dibujado estados simultáneos del movimiento de las partículas para los instantes que están consignados en el cuadro que va a continuación:

Instante	Estado de movimiento de los puntos
t=0	Todas las partículas se encuentran en la posición de reposo. La 1 comienza su oscilación.
$t = \frac{T}{4} = 3\frac{T}{12}$	Están vibrando los puntos 1, 2 y 3. El 4 inicia su oscilación. Téngase presente que entre los puntos 1 y 4 hay tres intervalos.
$t = \frac{T}{2} = 6\frac{T}{12}$	Están vibrando los puntos 1, 2, 3, 4, 5 y 6. El 7 inicia su vibración. Nótese que entre los puntos 1 y 7 hay seis intervalos y que para propagarse en cada uno de ellos la onda necesita 1/12 T.
$t = \frac{3T}{4} = 9\frac{T}{12}$	Están vibrando los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9. El 10 comienza su movimiento.
$t = T = 12\frac{T}{12}$	El punto 1 ha cumplido una vibración completa; el 7 media oscilación (una simple) y el 13 comienza a vibrar.

Sigamos el proceso durante medio período más. Para $t=3\frac{T}{2}=18\frac{T}{12}$ el punto 1 ha cumplido una oscilación y

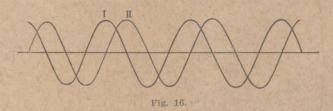
media; el 7 una oscilación, el 13 media oscilación y el 19 comienza su movimiento.

Es notorio que los puntos 1 y 13 tendrán en todo momento apartamientos iguales de la posición de reposo y que se mueven, además, en el mismo sentido, por lo que se dice que tienen igual fase. Lo mismo sucede con el 2 y el 14; el 3 y el 15, y así siguiendo.

Los puntos se encuentran sobre una senolínea.

Un movimiento con esas características se llama *ondu*latorio, y se dice que el movimiento se propaga por ondas.

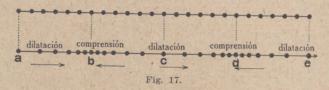
En la fig. 16 se han representado las posiciones de las partículas en dos instantes separados por el intervalo T/4.



El camino en que se propaga el movimiento vibratorio en el tiempo de una oscilación (período T) se denomina longitud de onda y se indica habitualmente con la letra griega λ (lambda). En el caso de la figura 15 ese camino es el comprendido entre el punto 1 y el punto 13. Puesto que el espacio es igual al producto de la velocidad por el tiempo, se tiene

$$\lambda = v T$$
 [1]

Ocupémonos ahora de las ondas longitudinales. La representación del proceso se logra de manera enteramente análoga a la del caso anterior; en lugar de elongaciones transversales se tienen elongaciones longitudinales en uno u otro sentido. Resulta así la distribución que se ve en la fig. 17, donde las flechas indican el sentido momentáneo del movimiento de los puntos. En unos lugares la materia se hace más densa, esto es, se *comprime*, en otros se enrarece, es decir, se *dilata*. Estas variaciones



son periódicas, como en el caso anterior. La definición de longitud de onda es la misma de antes, de modo que la fórmula es válida también para este caso.

La experiencia enseña que en los flúidos la propagación del movimiento es siempre longitudinal, mientras que



Fig. 18.

en los cuerpos sólidos elásticos la propagación se realiza tanto por ondas longitudinales como transversales.

En la fig. 18 se ha representado el estado ondulatorio,



Fig. 18 a.

en un instante dado, producido en el aire por una campana en vibración.

La fig. 18a representa el estado ondulatorio de la misma masa de aire medio período después. Donde antes había una compresión del aire, hay una dilatación y viceversa.

4. Las ondas superficiales de los líquidos. — Si se presiona momentáneamente en un punto de la superficie de una masa líquida en reposo, se origina un movimiento ondulatorio que se propaga en todas direcciones.

Los puntos más altos, cúspides, y los más bajos, valles, forman círculos cuyo centro se encuentra en el lugar del choque y que se propagan con la misma velocidad en todas direcciones; sus radios aumentan continuamente con

el tiempo.

Ese movimiento puede reproducirse, sucesivamente, cierto número de veces, presionando periódicamente en el mismo punto; así pueden observarse mejor los fenómenos. En un lago, por ejem., sería suficiente dejar caer, en el mismo punto, de tanto en tanto, pequeños trozos de un cuerpo sólido.

Podrá observarse que las masas líquidas, mejor dicho, las partículas no sufren, dentro de intervalos finitos de tiempo, desplazamientos apreciables; un trozo de corcho situado en un punto cualquiera se encontrará ora en el vértice de una cúspide ora en la de un valle, pero su posición media será invariable. Lo que se propaga en todas las direcciones de la superficie es, pues, tan sólo el me vimiento.

Los hermanos Ernesto, Enrique y Guillermo Weber han investigado a fondo el movimiento ondulatorio de los líquidos alrededor del año 1825. Según ellos, el movimiento ofrece las siguientes características:

a) Las trayectorias de las partículas son elipses que se aproximan a la forma circular; con el aumento de profundidad las trayectorias se hacen, a la vez que menores, más y más alargadas, hasta que finalmente consisten en líneas rectas horizontales;

b) El movimiento se nota hasta una profundidad igual a unas 350 veces la amplitud de las ondas.

En la fig. 19 se ha representado la manera cómo se produce la propagación de la onda. Los caminos de las partículas se han supuesto circulares, lo que parece ocu-

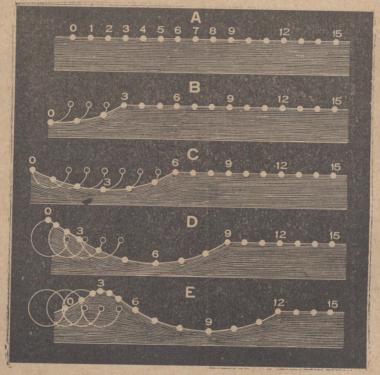


Fig. 19.

rrir cuando el movimiento es muy regular; las partículas 1 a 15 guardan entre sí tal distancia que el tiempo que tarda la perturbación en pasar de una a otra es igual a la doceava parte del período, esto es, del tiempo que tarda un punto en describir por completo su trayectoria circular.

La A se refiere al instante t=0 y las otras a los instan-T T 3T

tes $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{31}{4}$ y T respectivamente. En el instante repre-

sentado por la curva B el punto O ha recorrido la cuarta parte de su trayectoria y la ondulación ha llegado hasta el punto 3, que en ese preciso momento iniciará su movimiento; en el representado por C el punto O ha descrito la mitad de su camino y el movimiento se ha propagado hasta la partícula 6 recorriendo un camino que será igual a media longitud de onda. En la E el punto O ha vuelto a su posición inicial y el movimiento se ha propagado hasta el punto O ha vuelto a su posición inicial y el movimiento se ha propagado hasta el punto O0; el camino recorrido por la ondulación es el largo de onda.

Las posiciones sucesivas de las partículas 1 a 12 y de las siguientes, en el transcurso del tiempo, se obtienen sin dificultad.

En la fig. 20 la curva que limita la parte con aspecto de líquido correspondiente al instante t=2T, es decir, al



Fig. 20.

instante en que la partícula O ha vuelto por segunda vez a su posición inicial y la 12 por primera; el movimiento se ha propagado hasta el punto 24.

Las otras tres curvas, contadas sucesivamente hacia la derecha, corresponden a instantes que distan de ese mo-

mento los intervalos de tiempo $\frac{T}{4}$, $\frac{T}{2}$, $\frac{3T}{3}$, respectiva-

mente.

5. Superposición de ondas. — Si en un medio elástico se propagan dos ondulaciones en la misma dirección, el movimiento resultante se obtiene por el principio de superposición.

El movimiento de uno cualquiera de los puntos es la suma — en el caso supuesto algebraica — de los movimientos que le imponen cada una de las ondas componentes, vale decir, las elongaciones resultantes son, en todo instante, iguales a la suma de las elongaciones que originarían las perturbaciones componentes si actuasen solas.

Puesto que — lo cual puede evidenciarse gráficamente, p. ejem. — dos oscilaciones simples paralelas de la misma frecuencia originan una oscilación también sinusoidal y del mismo período, y cuya amplitud depende de la diferencia de fase, se sigue:

Que dos ondas sinusoidales de igual longitud que se propagan en la misma dirección y sentido dan, por superposición, una onda sinusoidal de igual longitud que se propaga en la misma dirección.

En el caso en que las ondas se propagan en la misma dirección, pero en sentidos opuestos, la amplitud de la oscilación depende del lugar. Hay lugares donde la amplitud es mínima (nodos), y lugares en que es máxima (vientres), según veremos.

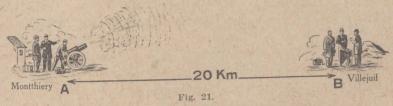
6. Propagación del sonido. Velocidad de propagación en distintos medios. — A. Velocidad en el aire. — Las ondas que producen la sensación del sonido, son las ondas longitudinales.

La experiencia enseña que la velocidad de propagación del sonido no depende ni de la intensidad ni de la altura del mismo, siendo su valor en aire seco, a la temperatura

de 0° C, en números redondos, 331 $\frac{m}{c}$.

Con la temperatura aumenta la velocidad.

De entre los diversos métodos empleados para determinar esa velocidad, destacamos la que fué empleada por una comisión designada por la Academia de Ciencias de París en el año 1738, y luego por otra comisión nombrada en el año 1822 por el Bureau de Longitudes. Esta última comisión, compuesta por Prony, Arago, Mathieu, Humboldt, Gay Lussac y Bouvard, hizo sus medidas entre Mont-



thiery (punto A) y Villelluif (punto B), a la distancia de veinte kilómetros (fig. 21). Si en A se dispara un cañonazo y un observador situado en B mide el tiempo comprendido entre la percepción del fogonazo y la del ruido, ese tiempo es, con gran aproximación, el que tarda el sonido en propagarse de A hasta B, pues la luz se propaga con una velocidad muy grande (300.000 kilómetros por segundo).

Tres observadores se situaron en A y tres en B. Se hicieron doce disparos de cañón en cada estación para eliminar la influencia del viento. El término medio de las determinaciones dió para la velocidad, como dijimos, en números redondos

$$v = 331 \frac{m}{\text{seg}}.$$

a 0° C.

B. Velocidad en el agua. — En el año 1826 Colladon y Sturm determinaron experimentalmente la velocidad del sonido en el agua, por el siguiente procedimiento. En el preciso instante en que el martillo b (fig. 22), golpea la campana C situada en el seno del agua, la llama e encien-

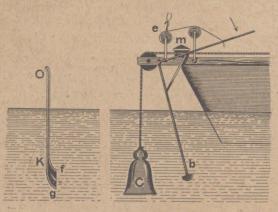


Fig. 22.

de cierta cantidad m de pólvora. Un observador situado a cierta distancia conocida, mide el tiempo transcurrido entre la percepción luminosa y la acústica que le transmite al oído una trompe-

tilla K de abertura fg vertical, sumergida en el líquido a la misma altura que la campana.

De esas observaciones resultó para la velocidad del sonido en el agua el valor

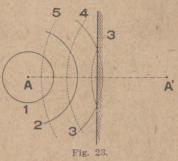
$$v = 1435 \frac{m}{seg}.$$

C. Velocidad en los sólidos. — Por procedimientos que no es del caso mencionar aquí, se determina la velocidad del sonido en los sólidos. Damos a continuación las velocidades de propagación en varios sólidos, en metros por segundo.

Cuerpo	Velocidad m/seg.
Acero	5560
Hierro	4310
Plomo	1230

7. Reflexión del sonido. Eco. — Si en el punto A (fig. 23) se produce un sonido, las ondas sonoras formarán superficies esféricas de centro en A cuyo radio irá aumentando progresivamente. Si en el trayecto de las ondas sonoras

se encuentra un obstáculo, por ejemplo una pared, el sonido se refleja en ella. Así se superponen a las ondas emitidas por el punto A otras ondas cuyo centro está en un punto A' simétrico de A con respecto a la pared. Este fenómeno constituye lo que se llama la reflexión del sonido. En la figura



los números 1, 2, 3, 4, etc., indican las sucesivas posiciones de una misma onda. De este modo si en el punto A se sitúa una persona, p. ejem., y emite un sonido cualquiera, oirá a éste dos veces, la primera vez directamente y la segunda después de la reflexión del sonido sobre la pared. Si el punto A está situado cerca de ésta, a causa de la persistencia de las impresiones sonoras en el oído, el observador percibirá los dos sonidos confundidos, pues, cuando llega el sonido reflejado persiste aún en su oído la impresión recibida primeramente. Aproximadamente la

persistencia de las impresiones sonoras es de $\frac{1}{10}$ de segundo,

por lo que, para oír el sonido recibido directamente y el reflejado separados, será necesario que el tiempo empleado por el sonido entre ir a la pared y volver sea por lo menos

 $\frac{1}{\det \frac{1}{10}}$ de segundo. Para esto el punto A deberá estar dis-

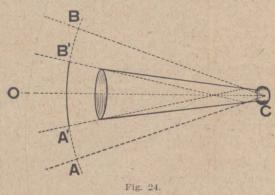
tante de la pared unos 17 metros, lo que hace que el camino recorrido entre ida y vuelta sea de 34 metros, pues

siendo la velocidad del sonido en el aire en las condiciones

comunes de 330 $\frac{m.}{seg.}$, 34 metros serán recorridos en $\frac{1}{10}$ de

segundo. Si los dos sonidos se perciben bien distintamente, se dice que se ha producido el *eco*, para lo cual se requiere, según acabamos de ver, una distancia mínima a la superficie reflejante de 17 metros. Cuando esta distancia es menor, se dice que se produce resonancia.

Una bocina o portavoz tiene por objeto concentrar el sonido en determinada dirección, lo que se logra merced

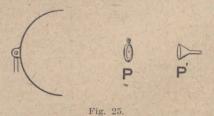


a las sucesivas reflexiones del mismo en las paredes de la bocina. De este modo la onda sonora que se emite en C (fig. 24), en lugar de ocupar al cabo de cierto tiempo la superficie esféri-

ca ACB, ocupará solamente la superficie A'CB', mucho menor que la ACB, por lo cual la intensidad del sonido

será mayor, puesto que la misma energía está repartida en una superficie de onda menor.

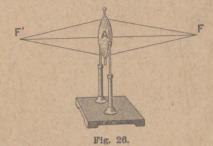
Un rayo acústico se refleja obedeciendo a las mismas leyes que la reflexión de la luz, las cuales



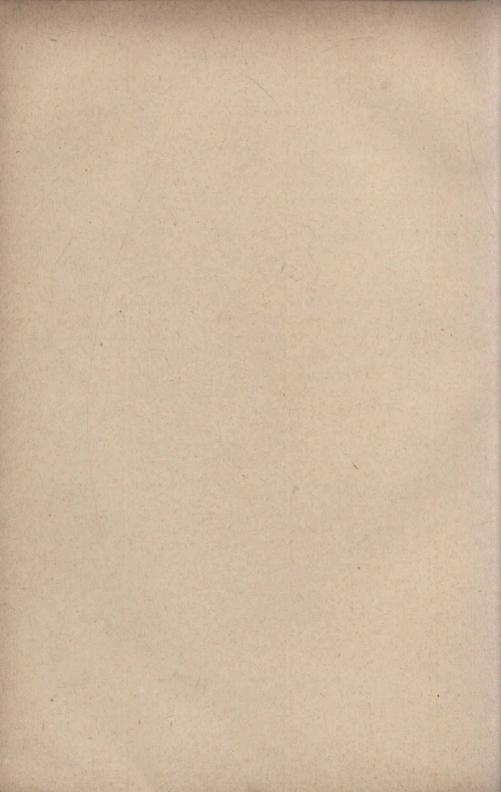
estudiaremos más adelante. Si se coloca un reloj en la proximidad de un espejo cóncavo (fig. 25), los rayos reflejados se encontrarán en cierto punto P que es el conjugado de P, como es fácil comprobarlo mediante la instalación que muestra la figura desplazando convenientemente el pequeño cono receptor.

8. Refracción del sonido. — Cuando una onda sonora pasa de un medio a otro donde la velocidad del sonido es diferente, los rayos sonoros sufren una desviación, siendo

conocido este fenómeno con el nombre de refracción. Lo mismo que en la reflexión del sonido, en la refracción las leyes son las mismas que para la luz, por lo cual nos limitaremos aquí a describir brevemente el modo como ha podido



comprobarse experimentalmente la refracción de las ondas sonoras. Sondhauss en el año 1852 comprobó la refracción del sonido por medio de una gran lente hueca de colodio (fig. 26), que llenaba con anhídrido carbónico. Los rayos sonoros que parten de F se concentran en el foco conjugado de la lente F, lo cual se pone de manifiesto por el oído.



CAPÍTULO III

ONDAS ESTACIONARIAS

1. Vibraciones de las cuerdas. — Para mayor sencillez supongamos que operamos con una cuerda de guitarra tendida entre dos puntos A y B que pueden considerarse como puntos fijos de la misma. Si la tomamos por su punto medio y la abandonamos luego, la cuerda cumple un movimiento vibratorio transversal ocupando las posiciones suce-

sivas que enseña la fig. 27. Es decir, que en una posición extrema, la cuerda está en la posición AQ'P'R'B y en la otra posición extrema en AQ"P"R" B. Dicho de otro modo, el punto



P oscila entre P' y P" con la amplitud PP' = PP"; el Q entre Q' y Q" con la amplitud QQ" = QQ'; el R entre R' y R" con la amplitud RR' = RR".

La teoría y la experiencia enseñan que la altura del sonido que emiten, que es igual al número n de oscilaciones de la cuerda, depende de su tensión T, es decir, de la fuerza con que está tendida, de la masa de la unidad de longitud m, y de su longitud L, en la siguiente forma:

$$n = \frac{1}{2.L} \sqrt{\frac{T}{m}}$$
 [1]

Si la cuerda es cilíndrica, de radio r y la materia que la constituye es de densidad d, la masa m de la unidad de longitud está dada por la expresión:

$$m = \pi r^2 d$$

que introducida en la [1] la convierte en:

$$n = \frac{1}{2Lr} \sqrt{\frac{T}{\frac{1}{\pi}d}}$$
 [2]

La [2] dice: Que las frecuencias de las vibraciones de una cuerda son proporcionales a la raíz cuadrada de la tensión e inversamente proporcionales a la longitud, al radio y a la raíz cuadrada de la densidad.

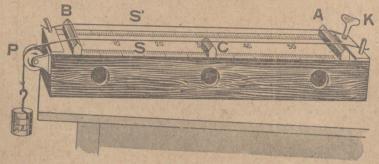
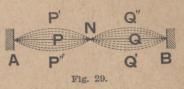


Fig. 28.

Estas leyes pueden comprobarse mediante el aparato llamado sonómetro que representa la fig. 28. La cuerda se tiende mediante un peso P y su longitud se varía con los caballetes A y B. El caballete auxiliar C, que se emplea para otros experimentos que conoceremos pronto, se retira para realizar las comprobaciones que terminamos de mencionar.

A una cuerda también puede lograrse hacerla vibrar como indican las figuras 29 y 30, y así siguiendo. En la primera el movimiento no sólo es nulo en los puntos fijos

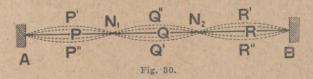
A y B, sino también en el punto medio N, que es un nodo. Los puntos P y Q son los que oscilan con la mayor amplitud, de modo que allí están los vientres. Las posiciones extremas



de la cuerda son AP'NQ'B y AP''NQ''B, de modo que cuando P está en P' el punto Q está en Q'. En la segunda son $nodos\ N_1$ y N_2 ; las posiciones extremas de la cuerda son $AP'N_1Q'N_2R'$ y $AP''N_1Q''N_2R''$, de modo que cuando P está en P', Q está en Q', R en R'.

Se dice en estos casos, que en la cuerda existe una *onda* estacionaria.

Al sonido que emite la cuerda cuando vibra como indica la fig. 29, se le llama primera armónica. Su altura es el doble que el del sonido que emite en el caso de la fig. 28, que se llama sonido fundamental. Al que emite cuando oscila como lo representa la fig. 30, se le designa segunda



armónica y así siguiendo. La segunda armónica tiene una frecuencia triple que el sonido fundamental.

La fig. 31 da idea de un experimento que permite hacer notorios los vientres y nodos de la oscilación de una cuerda. Si se colocan pequeños caballetes de papel en puntos n_1 , n_2 , tales que $an_1 = n_1n_2 = n_2b = bc$ y en los puntos intermedios de los tres primeros intervalos y tocando en b con una pluma se excita la cuerda entre b y c con un

arco de violín, se verá que quedan en reposo los caballetes en n_1 y n_2 y que los restantes son arrojados. La razón de

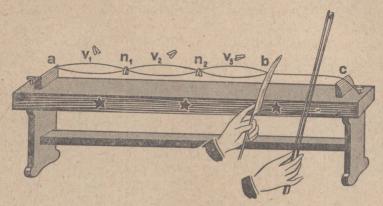
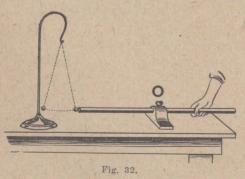


Fig. 31.

esto es que la cuerda vibra de modo que n_1 , n_2 y b son nodos y los puntos intermedios vientres.

2. Vibraciones longitudinales de las barras. — Si se tiene una barra (fig. 32) fija en su punto medio y se hacen

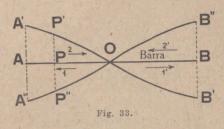


tracciones rítmicas sobre ella mediante un paño espolvoreado con polvo de brea, se percibirá un sonido bastante intenso, que revela un estado de vibración de aquélla. Que esas vibraciones son longitudinales se com-

prueba acercando a uno de sus extremos un pequeño péndulo, el cual es botado por la barra.

En la fig. 33 se han representado, de modo convencional, posiciones extremas que toma la barra en su movimiento. Una posición extrema es la A'OB' y la otra la

A"OB". La representación es convencional porque los desplazamientos transversales hacia arriba corresponden a desplazamientos longitudinales hacia la derecha y desplazamientos transversales hacia aba-



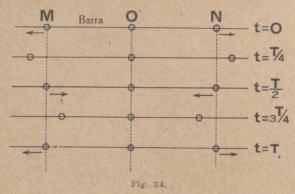
jo, corrimientos longitudinales hacia la izquierda.

Es decir que AA' representa el desplazamiento de A hacia O y AA" el desplazamiento en sentido opuesto. Es decir que A oscila en la dirección misma de la barra con la amplitud AA' = AA". De la misma manera B oscila longitudinalmente con la amplitud BB' = BB" que es igual a AA' porque B es un punto simétrico de A. Otro punto cualquiera como el P vibra con la amplitud PP' = PP". Durante medio período los puntos comprendidos entre O y A se mueven en el sentido de la flecha 1 y los puntos comprendidos entre O y B en el sentido de la flecha 1' alcanzando en la mitad de ese intervalo de tiempo la posición extrema A"OB". Durante el medio período restante los puntos de la primera según se mueven en el sentido de la flecha 2 y los de la segunda en el sentido de la flecha 2'.

Para mayor claridad representamos las posiciones de dos puntos cualquiera M y N de la barra (fig. 34), situados simétricamente respectó a O en los instantes t=o, $t=\frac{T}{4}$;

$$t = \frac{T}{2}$$
; $t = 3\frac{T}{4}$ y $t = T$. Las flechas indican el movimiento.

En las posiciones donde las flechas no existen es porque la velocidad de las partículas es nula. Pasa aquí lo mismo que en el péndulo: en las posiciones extremas la velocidad



es nula; cuando pasa por la posición de reposo, la velocidad es máxima. En los extremos A y B (fig. 33), se tiene, pues, un vientre del movimiento y en O un nodo.

También puede hacerse vibrar una barra fija en su punto medio, de modo que tenga (fig. 35) además del nodo O, en el punto fijo, otros dos nodos N_1 y N_2 . Los vientres del movimiento son, en ese caso, además de los extremos, V_2 y V_3 Es por otra parte.

 V_1 y V_2 . Es, por otra parte, $ON_1 = ON_2 = 2/3 \ OA$.

A N₁ V₁ O V₂ N₂ B

El movimiento de una barra que está fija por uno

de sus extremos, es idéntico al que cumple una cualquiera de las dos porciones OA y OB de la barra fija en el punto medio O.

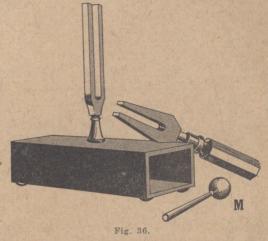
3. Vibraciones transversales de las barras. Diapasón. — Las oscilaciones transversales que es capaz de cumplir una barra fija en su punto medio o en uno de sus extremos son tales que la barra toma realmente las posiciones extremas A'OB' y A''OB'' (fig. 33). Aquí no se trata, como en el caso anterior, de una representación convencional sino de una representación real. El punto A oscila transversalmente con la amplitud AA' = AA''; el B con la BB' = BB'' = AA'

y otro P cualquiera con la PP' = PP''. Cuando A está en A', B está en B'.

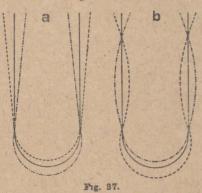
También puede hacerse vibrar una barra de modo que

sus posiciones extremas sean las que representa la figura 35.

El diapasón consiste en una barra de acero, de sección rectangular, plegada en forma de horquilla que se continúa, en el lugar del pliegue, en otra barra metálica, destinada a llevar un mango o a



permitir su fijación adecuada. En la fig. 36 se ven dos de tales dispositivos, uno de ellos montado en una caja



de madera. Se le puede hacer vibrar de diferentes maneras; p. ejem., golpeándolo con un martillo M dotado de una pieza de goma M (fig. 36), o excitándolo con un arco de violín o mediante un pequeño electroimán situado entre sus ramas.

En la fig. 37 están representadas las posiciones

extremas de dos de las maneras en que puede vibrar. La primera corresponde al sonido fundamental y la segunda a la primera armónica.

Fig 38.

4. Vibraciones de los tubos. — En la fig. 38 se ha representado un tubo del tipo que se utiliza como fuente de sonido en los órganos. Se construyen de madera y también

metálicos, en cuyo caso la sección es de forma circular, pudiendo ser el extremo superior abierto,

como en la figura o cerrado.

Si se insufla aire por la embocadura del tubo, la corriente sale por la angosta abertura cd que deja libre la pieza prismática interior visible en la figura y cae sobre el labio ab. El chorro es allí dividido y desviado, generándose un proceso oscilatorio complicado, un chirrido, que se percibirá a no estar el tubo, como sucede cuando se sopla fuertemente contra el filo de un cuchillo o el borde de una tarjeta. Esas oscilaciones hacen vibrar la columna de aire que limita el tubo, el cual emite un sonido cuya altura depende de la longitud de éste.

A. Extremo superior cerrado. — La columna de aire vibra exactamente de la misma manera que una barra fija por uno de sus extremos que oscila longitudinalmente. Los movimientos de las masas de aire son exactamente iguales a las de los elementos de masa de una de las porciones OA u OB de la barra de la fig. 33. Se tiene así la nota fundamental. También puede vibrar la

columna como la porción OB u OA de la fig. 35. Se produce así la primer armónica.

B. Extremo superior abierto. — El tubo tiene, por lo dicho, los dos extremos abiertos. En estas condiciones la columna de aire vibra exactamente como una barra que oscila longitudinalmente, teniendo sus dos extremos libres.

Los movimientos de las masas de aire son exactamente iguales a los de los elementos de masa de toda la barra

AB, figs. 33 y 35. Es decir, que A y B corresponden a los extremos abiertos del tubo.

5. Resonancia. — Si una hamaca (fig. 39), en la cual suponemos sentada una persona, se la desvía de su posición de equilibrio y se le abandona luego a la libre acción de la gravedad, cumple un movimiento vibratorio.

Si queremos que la hamaca siga oscilando, es menester

Fig. 40.

empujarla de tanto en tanto, de modo de acrecentar su movimiento. Esto es lo que



Fig. 39.

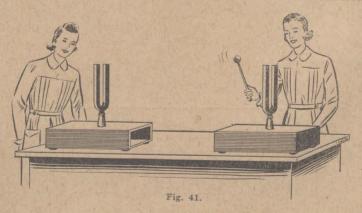
hacen todas las personas cuando hamacan a otra: impulsan la hamaca cada vez que ésta alcanza una posición extrema. El intervalo de tiempo comprendido entre dos impulsos sucesivos es, pues, igual al período de la hamaca, que es como sabemos el tiempo de oscilación. De este modo puede darse a la hamaca una gran amplitud de movimiento.

Si se tiene (fig. 40) una serie de varillas elásticas, cada una de ellas es capaz de

vibrar si se le aparta de su posición de reposo con un período que le es propio. Aun cuando todas las varillas están fijas al mismo soporte, tomando a éste con la mano e imprimiéndole un movimiento oscilatorio, se puede hacer vibrar a cualquiera de las varillas sin que oscilen las demás. Basta que el período con que se hace vibrar al soporte coincida con el período de la varilla que se quiere hacer oscilar, pues así los impulsos del soporte obran sobre la varilla, de modo de incrementar su movimiento. En cambio, en una cualquiera de las varillas restantes, como el período de la misma no coincide con la del soporte, ocurre que cuando se mueve en un sentido; la varilla lo hace en el opuesto, siendo anulado su movimiento.

La varilla que oscila bajo la acción del movimiento oscilatorio del soporte se dice que resuena o que está en resonancia con éste.

La caja con que se dota a los diapasones (fig. 36), se llama de resonancia, porque se le ha dado dimensiones

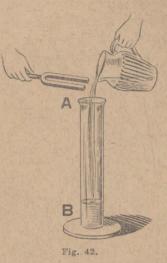


tales, que la columna de aire que encierran, tenga el mismo período que el diapasón. Cuando éste oscila, la columna de aire de la caja oscila también por resonancia o simpatía, como, se dice.

Si se tienen dos diapasones que emiten la misma nota, montados en sendas cajas de resonancia, puestos uno frente a otro de modo que las aberturas se miren (fig. 41) y se excita uno de ellos, se percibirá luego, aun extinguiendo las oscilaciones del primero, que el otro también vibra.

Las ondas acústicas que parten de la caja del diapasón excitado, inciden sobre la masa del aire del otro y la ponen en vibración. Estas vibraciones a su vez excitan el diapasón.

Si se tiene una probeta AB (fig. 42) y se hace vibrar frente a ella un diapasón, el aire de la probeta tiende a vibrar también, y cuando la longitud de la columna de aire sea tal que su período propio de vibración coincida en el período del diapasón, habrá resonancia, y la amplitud



de vibración del aire será entonces máxima, produciendo un refuerzo en la intensidad del sonido, que se aprecia muy fácilmente.

6. Nociones de acústica musical. Acordes. Consonancia y disonancia. Intervalos musicales. — La experiencia enseña que si el oído humano es excitado simultáneamente por dos sonidos de frecuencias diferentes, el carácter de la sensación depende, exclusivamente, de la relación de las frecuencias, y no de los valores absolutos de éstas.

Si la sensación es agradable se dice que se trata de un acorde consonante, y si es desagradable, que se ha producido una disonancia.

Si los sonidos se siguen uno después de otro y la sensación es agradable, se habla de un acorde melódico. La sensación es tanto más agradable, vale decir, el acorde es tanto más perfecto cuanto más simple es aquella relación.

La relación de la frecuencia mayor a la menor se designa con el nombre de *intervalo musical*; los intervalos resultan expresados, según esto, por números enteros o fracciones impropias.

En la música se usan tan sólo algunos intervalos. La escala o gama mayor, cuya primera nota o tónica es do, consiste de ocho frecuencias, cuyas designaciones, e intervalos con respecto a la tónica, están consignadas en el siguiente cuadro:

do	1 unísono
	1
re .	9
mi .	5
	$\frac{3}{4}$ tercera
fa.	4
	····· — cuarta
The same	3
sol	····· quinta
	5
la .	$\cdots \qquad {3}$ sexta
10,87	15
si.	····· — séptima
	8 2
do .	— octava
	1

Las denominaciones de la derecha indican el rango de las notas en la escala.

Se obtienen todas las escalas de los sonidos musicales continuando la gama en ambos sentidos, conservando los mismos intervalos y denominaciones, con la diferencia de subfijos; cada nota de una de las escalas será la octava de la homóloga de la escala anterior y la tónica la octava de la precedente.

Se escribiría, pues,

$$do_1, re_1, \ldots, si_1; do_2, re_2, \ldots, si_2; do_3, re_3, \ldots, si_3; do_4, \ldots$$

Como en la gama se dan solamente las relaciones de las alturas de los sonidos con respecto a la tónica, los valores absolutos de las frecuencias quedan determinados si se fija el de una sola nota de cualquiera de las escalas.

Como ya se dijo, en el congreso reunido en Viena en 1885 se definió como diapasón normal a un diapasón cuya frecuencia a 0° C es de 435 oscilaciones dobles por segundo, dándole el nombre de *la*₃ o *la* normal.

Las frecuencias de otras notas se calculan, mediante esa definición, en forma muy sencilla.

Se tiene, por ejemplo,

$$la_1 = \frac{435}{4}$$

y para el do1, que es la nota más grave de los bajos,

$$do_1 = \frac{la_1}{5} = \frac{435}{4} \cdot \frac{3}{5} = 65,25 \frac{vibraciones\ dobles}{segundo}$$

y para el do5, que es la nota más aguda de los sopranos:

ra el
$$do_5$$
, que es la nota mas aguda de los soprats.
$$do_5 = \frac{la_5}{5} = 435 \cdot 4 \cdot \frac{3}{5} = 1044 \frac{vibraciones\ dobles}{segundo}$$

respectivamente.

7. Sostenidos y bemoles. Gama temperada. — Motivos de indole musical, en orden a la cual estamos muy lejos de considerarnos expertos, han hecho indispensable el uso de otros intervalos. A cada una de las siete notas de una cualesquiera de las escalas se hace corresponder dos notas, un sostenido y un bemol.

La frecuencia del sostenido se obtiene multiplicando la de la nota a la que corresponde por $\frac{25}{24}$ y la del bemol por $\frac{24}{25}$ los intervalos que definen con su nota son, pues, $\frac{24}{25}$ y $\frac{25}{24}$

El empleo de una gama completa, que con sus sostenidos y bemoles comprende 21 notas, es posible en instrumentos como el violín, violoncelo, etc., en los que, modificando la longitud de las cuerdas, es posible variar, dentro de grandes límites, la frecuencia de las oscilaciones. En instrumentos en los que, como en el órgano y el piano, las frecuencias de las oscilaciones de los tubos o cuerdas son fijos, sería sumamente incómodo utilizar las escalas completas.

En los pianos, p. ejem., que llevan siete octavas, el número elevado de teclas (21 por octava) haría la ejecución por demás dificultosa.

Se usa en tales casos de una gama llamada temperada en la que se confunde el sostenido de una nota con el bemol de la siguiente.

El intervalo de la octava queda dividido así en doce intervalos iguales a $\sqrt[12]{2}$.

CAPITULO IV

PROPAGACIÓN DE LA LUZ. INTENSIDAD DE ILUMINACIÓN Y LUMINOSA

1. Propagación rectilinea de la luz. — En un medio homogéneo, la luz se propaga en línea recta. Haces de luz del

sol que se filtran entre las nubes, los cuales se hacen muy visibles en ciertas ocasiones, producen la certidumbre de que la propagación es ver-

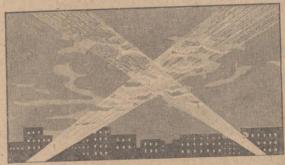
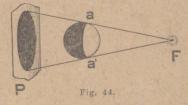


Fig. 43.

daderamente rectilínea. Igual convicción se recibe viendo la trayectoria de la luz de un poderoso reflector en la

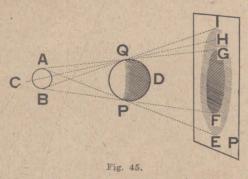
atmósfera durante la noche (fig. 43).



La luz que se propaga según una línea recta cualquiera, constituye un rayo de luz. En la fig. 43 se han dibujado muchos de esos rayos.

Si se tiene un foco luminoso muy pequeño (fig. 44), y frente un cuerpo opaco, debido a la propagación recti-

línea de la luz detrás del cuerpo dentro del ángulo sólido aFa' existe oscuridad. Si se sitúa una pantalla P, en la posición que muestra el dibujo, aparece sobre ella una



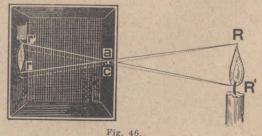
región bien oscura. que es la sombra del cuerpo.

Si en lugar de un foco pequeño se tiene un foco de superficie extendida. como el AB (fig. 45), es notorio que detrás del cuerpo en la región cónica GOPF

existe completa oscuridad porque a esa región no llega luz de ninguno de los puntos del foco luminoso AB y de que a medida que nos alejamos de esa zona aumenta el número de rayos de luz que penetran, provenientes de diferentes lugares de AB. De la sombra se pasa pues a zonas más y más iluminadas, la penumbra, hasta la región de claridad uniforme.

A la propagación rectilínea de la luz se debe también la imagen invertida que de un objeto da la cámara oscu-

ra (fig. 46), que consiste en una caja en la cual no puede entrar luz sino por un pequeño orificio circular de un diámetro de unos 3/4 de milímetro



practicado en el centro de una de las caras, siendo traslúcida la opuesta.

Se dice que Thales de Mileto determinaba la altura de los obeliscos de Egipto, ante el asombro del rey Amasis, haciendo uso de la semejanza de triángulos, fundándose en el hecho de la propagación rectilínea de la luz.

Si BD, (fig. 47), es la longitud de la sombra provectada por el Sol de un obelisco de altura AD y bd, la longitud de

la sombra provectada por una regla vertical ad de longitud conocida, se tiene que

$$\frac{BD}{bd} = \frac{DA}{da}$$
.

Conociendo da y midiendo BD v bd se calcula AD.

2. Velocidad de propagación. —

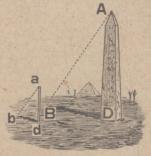
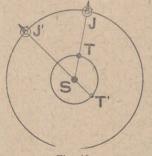


Fig. 47.

Durante mucho tiempo se crevó que la luz no empleaba tiempo alguno en pasar de un punto a otro, es decir, se admitía que su propagación era instantánea, o, lo que es lo mismo, que su velocidad era

infinita.

El primero que llegó a la conclusión opuesta, como consecuencia de sus mediciones astronómicas referentes a los satélites de Júpiter. en el año 1675, fué Olaf Roemer, asistente en el Observatorio de Paris del director del mismo. Domingo Cassini.



I. EL MÉTODO DE ROEMER. — En

la fig. 48, S es el Sol, el primer círculo la órbita de la tierra y el segundo, de mayor diámetro, la de Júpiter, el cual, alumbrado por el Sol, proyecta tras de sí un cono de sombra. Roemer observaba los instantes de desaparición del primero de los satélites de Júpiter en ese cono.

Así determinó el tiempo que ese satélite empleaba en dar una vuelta en torno de aquel planeta (42 horas 28 minutos). Observando cuando la tierra estaba en T y Júpiter en J (conjunción) y luego cuando las posiciones de esos cuerpos estaban próximas a T y J (oposición), encontró que había una diferencia de cerca de 1.000 segundos entre el instante de una desaparición del satélite en la segunda posición, calculada sumando al instante de una desaparición para la primer posición (TJ) el tiempo correspondiente a las revoluciones del satélite entre las posiciones TJ y T y el instante dado por la observación directa.

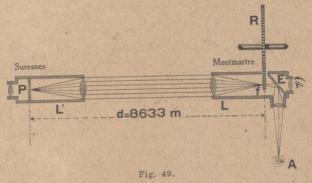
Cuando se observa desde T, la luz recorre el camino JT y cuando se lo hace desde T el camino JT. Si la velocidad de la luz fuese infinita, la diferencia entre esos caminos, diferencia que es igual al diámetro de la órbita terrestre, no tendría ninguna influencia sobre los resultados.

Ante el hecho que acabamos de mencionar, Roemer se persuadió que la luz no se propaga instantáneamente, sino que necesita cierto tiempo para pasar de un punto a otro y de que aquella diferencia de tiempo de cerca de 1.000 segundos es el tiempo que emplea en recorrer la diferencia entre los caminos T^*J^* y TJ, es decir, la órbita terrestre.

Por este método se encuentra que la velocidad de la luz es de

No está de más mencionar que, por diversos motivos, el Director del Observatorio Cassini hizo una declaración pública expresando que no se solidarizaba con las conclusiones de Roemer.

Cincuenta años más tarde, en el 1725, se comprobó, por otro método, y esa comprobación fué unánimemente aceptada, que la velocidad de la luz era verdaderamente finita. II. Método de Fizeau. — El método precedente es astronómico. Fizeau fué el primero en idear y aplicar, en el año 1849, un método terrestre. En la fig. 49, está representada esquemáticamente su instalación. R es una rueda dentada, en la cual el ancho de los dientes es igual al de los espacios vacíos, que puede girar en torno a un eje horizontal. Un haz de luz, proveniente de A, que pasa entre dos dientes incide sobre un espejo P situado a cierta distancia d de la rueda y vuelve sobre sí mismo. Si la rueda está en reposo, el ojo ve la luz que vuelve porque



E es una simple lámina de vidrio de modo que al incidir sobre ella, parte de la luz se refleja y parte pasa a su través.

Si se hace girar la rueda y se aumenta lentamente su velocidad, cuando en el mismo intervalo de tiempo en que la luz pasa de f a P y vuelve a f, un diente ocupa el lugar que en el espacio ocupaba el vacío por el cual pasa el haz, el ojo deja ver la luz.

Si la rueda tiene N espacios iguales entre dientes y caladuras y da n vueltas por segundo, cuando sucede lo que terminamos de decir, el tiempo que emplea la luz en

recorrer el camino 2d es $\frac{1}{Nn}$. Contando N y midiendo n y

d se puede calcular fácilmente la velocidad de la luz.

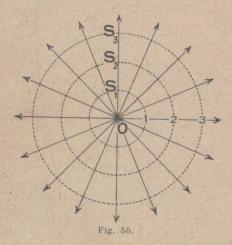
Fizeau hizo sus observaciones entre Suresnes y Montmartre, siendo d=8.633 metros, N=1.440 y n=12,6 vueltas. Así resulta para la velocidad de la luz

$$C = 313.000 \frac{km.}{seg.}$$

Con los métodos que acabamos de describir y con otros se han hecho muchas determinaciones, llegándose a la conclusión de que la velocidad de la luz es, con una aproximación, mayor que el uno por mil:

$$C = 300.000 \frac{km.}{seg.}$$

3. Intensidad de iluminación e intensidad luminosa. — Supongamos que O (fig. 50), es un punto luminoso y S_1 , S_2 ,



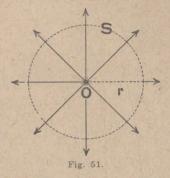
 S_3 , etc., superficies esféricas de 1 m., 2 m., 3 m., etcétera, de radio. Está claro que los rayos de luz que parten de O en todas las direcciones se distribuyen en el caso de la esfera S_2 sobre una superficie $2^2 = 4$ veces mayor que en el caso de la S_1 y en el caso de la S_3 sobre una superficie $3^2 = 9$ veces mayor.

Debido a eso la intensidad de iluminación en la tercera esfera es nueve veces, y la de la segunda cuatro veces menor que en la primera.

Si en O tuviésemos dos puntos luminosos iguales al anterior, ocurriría lo mismo que acabamos de decir, pero la intensidad de iluminación sería sobre cada una de las

esferas el doble que en el caso anterior. Esto es debido a que dos puntos luminosos iguales constituyen una fuente de luz de doble intensidad que el de un solo punto.

Se llama intensidad luminosa de un foco de luz a la intensidad de la iluminación que determina sobre un centímetro cuadrado situado a un metro de distancia, normalmente a la dirección de



los rayos. En estas condiciones se encuentran los elementos de 1 cm. 2 de área de la esfera S_1 de 1 m. de radio.

Si I es la intensidad luminosa del foco supuesto en O y E la intensidad de iluminación sobre una esfera S con centro en O de radio r (fig. 51), la ley contenida en lo que terminamos de explicar es:

$$E = \frac{I}{r^2} \tag{1}$$

Que esto es así lo demuestra lo siguiente:

Si

$$r=1 \text{ m.} \dots E=I$$
 $r=2 \text{ m.} \dots E=rac{I}{2^2}=rac{I}{4}$
 $r=3 \text{ m.} \dots E=rac{I}{3^2}=rac{I}{9}$

etc., lo cual concuerda plenamente con lo ya dicho.

La [1] da, pues, la iluminación que tiene sobre S un lector en las condiciones que enseña la fig. 52.

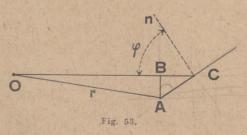
4. Iluminación en función de la distancia y del ángulo. — En lo que precede hemos supuesto siempre que los rayos



de luz caían normalmente sobre la superficie que iluminan.

Supongamos ahora que los rayos forman cierto ángulo con la normal a la misma. En la fig. 53, en O está el foco luminoso de intensidad I y la superficie iluminada es la AC, siendo AB un elemento de superficie de una esfera de radio, r = OA. Los rayos caen sobre AC formando con la normal n a la misma el ángulo φ .

Puesto que los mismos rayos que cortan AC inciden



sobre AB la iluminación sobre ésta tiene que ser mayor que sobre aquélla tanto como el área de AB es menor que

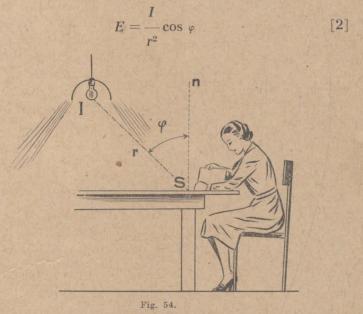
la de AC. De acuerdo con esto, siendo la intensidad de la iluminación sobre AB, según la [1].

$$E = \frac{I}{r^2}$$

y

$$\frac{AB}{AC} = \cos \varphi$$

la intensidad de la iluminación sobre AC debe ser:



La [2] da la iluminación que tiene sobre S un lector

en las condiciones que enseña la fig. 54.

5. Fotómetro de Bunsen. — Los fotómetros son dispositivos que permiten comparar las intensidades luminosas de dos focos cualesquiera.

Si uno de ellos se elige como unidad, es decir, como patrón, se tiene la medida, en esa unidad, de las intensidades de los demás.

El fotómetro de Bunsen consiste, en esencia, en una pantalla de papel (fig. 55), que tiene en su parte central una mancha M de aceite. Si están frente a ella, en las

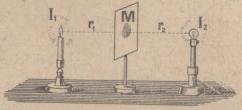


Fig. 55.

posiciones que indica la figura, dos focos luminosos cuando éstos determinan sobre la pantalla iluminaciones de igual intensidad, la mancha ofrece de ambos

lados aspectos idénticos. En tal caso se tiene, por consiguiente, si se representan con I_1 e I_2 , respectivamente, las intensidades de los focos y con r_1 y r_2 sus distancias al fotómetro,

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}$$

de donde

$$rac{I_2}{I_1} = rac{r_2^2}{r_1^2}$$

Esa expresión dice que la relación entre las intensidades luminosas I_2 e I_1 de dos focos que producen iguales iluminaciones a distancias r_2 y r_1 , respectivamente, están entre sí como los cuadrados de esas mismas distancias.

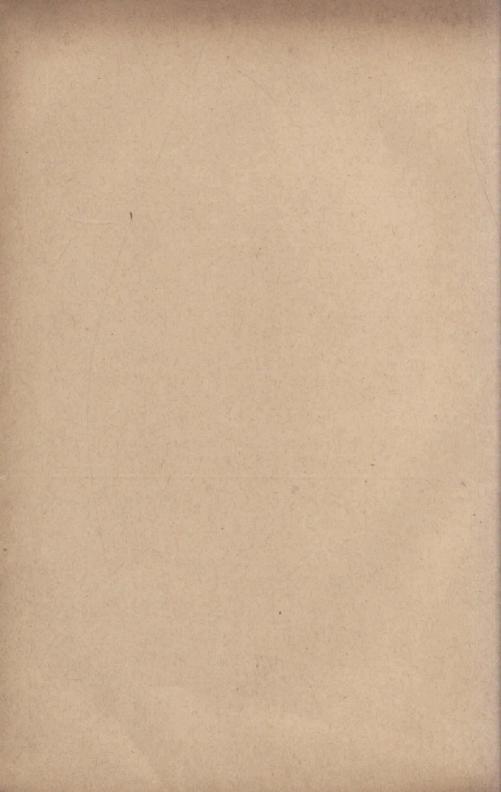
6. Unidades. — Un patrón de luz, es una fuente luminosa cuya intensidad se toma como unidad. No existe, hasta ahora, un patrón absoluto, porque no se conocen fuentes de gran constancia y fácilmente reproducibles.

El Congreso de electricistas reunido en París en el año 1881 adoptó como unidad, a propuesta del físico francés J. Violle, la intensidad que tiene en dirección a su normal la superficie de un centímetro cuadrado de una masa de platino fundido a la temperatura de fusión. En el Congreso de electricistas del año 1889, se eligió como unidad la vigésima parte de la unidad Violle, dándose el nombre de bujía decimal. Esta es la unidad usada en América, Inglaterra y Francia. En los dos primeros países se le llama "candle".

La intensidad de iluminación que produce una bujía

decimal a un metro de distancia se llama Lux.

En Alemania es muy empleada la lámpara de Heffner Alteneck, que consume acetato de amilo. La mecha es de 8 mm. de diámetro y la altura que se le da a la llama 40 mm.



CAPITULO V

REFLEXION Y REFRACCION DE LA LUZ

A. REFLEXIÓN. ESPEJOS PLANOS

1. Generalidades. — La experiencia enseña que si un haz de luz incide en la superficie de separación de dos medios una parte del mismo cambia de dirección, permaneciendo en el primer medio, fenómeno que se llama reflexión, y

el resto penetra en el segundo, desviándose también, fenómeno que se denomina refracción.

En la fig. 56, está dibujado un aparato, debido a J. Tyndall, que permite observar lo que acabamos de referir. Se trata de un cilindro metálico, cuya cara de adelante es de vidrio, lleno hasta la mitad de agua

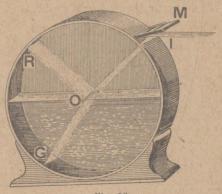


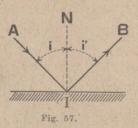
Fig. 56.

ligeramente enturbiada con leche, mástique (1) u otra substancia cualquiera fluorescente. Enviando un haz de rayos paralelos sobre el espejo M se hace incidir sobre la

⁽¹⁾ Mástique se puede comprar en cualquier droguería. Se disuelve en alcohol y de esta solución se echan algunas gotas al agua.

superficie del agua un haz IO. Se observa en seguida, dentro del líquido un haz OG de diferente dirección que el incidente IO, que es el haz refractado, y echando un poco de humo de cigarrillo dentro del cilindro se advertirá también, el haz $reflejado\ OR$ aunque, en general, más débil que el anterior.

2. Leyes de la reflexión. — Para mayor sencillez nos re-



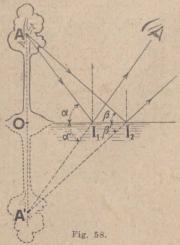
feriremos ahora a un rayo de luz.

Se llama ángulo de incidencia el que forma el rayo incidente AI con la normal IN (fig. 57), y el que forma ésta con el rayo reflejado IB, ángulo de reflexión.

Las leyes que rigen este fenómeno son las siguientes:

- 1. El ángulo de reflexión i', es igual al de incidencia, i.
- 2. El rayo reflejado está en el plano que forman el rayo incidente y la normal.

La reflexión de la luz se produce en la forma que acabamos de exponer cuando la superficie de separación de los dos medios es pulimentada. Si esa superficie es despulida, se produce la reflexión difusa, es decir, que de un delgado haz incidente, p. ejem., se producen una infinidad de rayos reflejados en muchas direcciones.



3. Espejos planos.—Las imágenes que se forman en los espejos planos constituyen una prueba categórica de las leyes de la reflexión. La imagen es idéntica al objeto y aparece detrás del espejo a una distancia igual a la que de éste está el objeto.

Todos los rayos, sin excepción alguna, que salen de un punto A del objeto (fig. 58), parecen provenir de un punto A', situado simétricamente a A detrás del espejo.

De acuerdo con las leyes de la reflexión, dos rayos cualesquiera, AI_1 y AI_2 , se reflejan de modo que $\alpha = \alpha'$ y $\beta = \beta'$ y, por consiguiente, las prolongaciones de los rayos reflejados deben pasar por un punto A' tal que OA = OA'.

El punto A' es la imagen de A. Esa imagen se llama virtual porque está formada por la intersección de las pro-

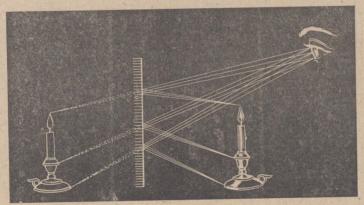


Fig. 59.

longaciones de los rayos reflejados y no por la de estos mismos. Es notorio que esa imagen no puede proyectarse sobre una pantalla.

En la fig. 59 se ha ilustrado con otro ejemplo esta misma cuestión.

Aprovechando los fenómenos que terminamos de describir, puede reproducirse fácilmente figuras planas, en la forma que enseña la fig. 60, que no requiere mayores explicaciones.

En la fig. 61 se indica un entretenimiento que se funda



Fig. 60.

en la propagación rectilínea v en la reflexión de la luz. Sobre la parte de la sombra de una persona que corresponde a la cabeza incide luz reflejada sobre un espejo en el cual se ha dejado en condi-

ciones de hacerlo, regiones que constituyen una máscara. La explicación de la formación de imágenes sobre espe-

jos que forman ángulo no ofrece dificultad alguna.

B. — Espejos Espéricos

4. Generalidades. — Un casquete de una superficie esférica pulimentada, constituve un espejo esférico. Si la cara pulimentada es la interna, el espejo es cóncavo: si es la externa, convexo. El centro

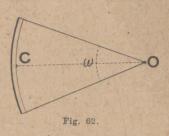


Fig. 61.

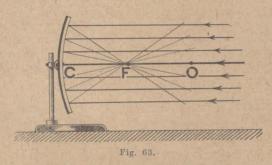
de curvatura O (fig. 62), de la esfera es el centro de curvatura del espejo. El punto C, vértice del casquete, es el centro óptico y OC el eje principal.

Se llama *abertura* de un espejo esférico el ángulo sólido ω bajo el cual se le ve desde el centro de curvatura.

Solamente en espejos de pequeña abertura todos los rayos que parten de un punto luminoso se cortan después de reflejarse sobre aquéllos en un punto, siempre que los rayos incidentes no formen un ángulo demasiado grande con el eje principal.



5. Espejos cóncavos. — I. Foco principal. — Si sobre un

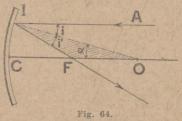


espejo esférico de pequeña abertura incide un haz de rayos paralelos entre sí y al eje principal (fig. 63), se reflejan pasando por un punto F que se llama foco principal del espejo. La

distancia de este punto al centro óptico C se llama distan-

cia focal.

El foco principal está en el punto medio del radio *OC* del espejo. Probémoslo. Si *IF* (fig. 64), es el rayo reflejado correspondiente al rayo incidente *AI* paralelo al eje principal, el ángulo *i* es igual

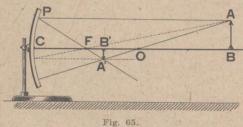


al i, de acuerdo con la primer ley de la reflexión, pues OI, que es un radio, es normal a la superficie del espejo en el punto I de incidencia y α es igual a i, y, por lo tanto,

igual a i'. El triángulo sombreado es, pues, isósceles, siendo IF = FO y como si el espejo es de pequeña abertura FI y FC son muy aproximadamente iguales, resulta que F está en el punto medio de OC, como se afirmó.

La distancia focal es, pues, igual a la mitad del radio de curvatura.

Representando esas magnitudes con f y r, respectivamente, se tiene



$$f = \frac{r}{2}$$

II. FORMACIÓN DE IMÁGENES. — La imagen A' de un punto A de un objeto AB (fi-

gura 65), está en la intersección de dos cualesquiera de los rayos que partiendo de A se reflejan sobre el espejo, pues todos esos rayos se cortan en un mismo punto que es, precisamente, A'. Para determinar este punto debemos elegir dos rayos de entre los tres siguientes que son de marcha conocida:

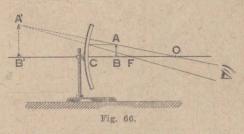
- 1.º El rayo AP, paralelo al eje principal, el cual, después de reflejarse, pasa por el foco.
- 2.º El rayo AO que pasa por el centro de curvatura y que por ser normal al espejo, se refleja sobre sí mismo.
- $3.^{\circ}$ El rayo AF que pasa por el foco y que se refleja paralelamente al eje principal.

La imagen de AB es A'B'. Como es notorio, es invertida. Esta imagen es real porque está formada por la intersección de los rayos mismos. Si se sitúa una pantalla en el lugar de A'B', normalmente al eje principal, aparece

sobre ella la imagen A'B'. Es fácil comprobar experimental y gráficamente que un espejo esférico da imágenes reales de los objetos que están del espejo a una distancia mayor que la focal, es decir, que están más allá del foco.

En la fig. 66 se ha construído la imagen de un objeto que está entre el foco y el espejo. Los rayos que se refle-

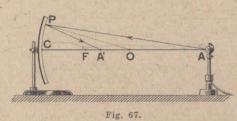
jan sobre éste partiendo de A producen en el ojo la impresión de que provienen de la intersección A' de sus prolongaciones. Y lo análogo sucede con los rayos que parten



de los demás puntos del objeto. La imagen A'B' del objeto AB es, pues, virtual. Además es derecha.

III. Fórmula de los focos conjugados. — En la fig. 67 el punto A' es la imagen del punto A. Si el primero fuese el punto luminoso, el segundo sería su imagen. Por eso se dice A y A' son focos conjugados. Puesto que de acuerdo

con la primera ley de la reflexión los ángulos APO y A'PO



son iguales y la bisectriz de un ángulo, en un triángulo, divide el lado opuesto en partes proporcionales a los lados adyacentes, se tiene

$$\frac{OA}{OA'} = \frac{PA}{PA'}$$
 [1]

Si el espejo es de pequeña abertura puede escribirse, con gran aproximación,

$$PA = CA = p$$

$$PA' = CA' = p'.$$
[2]

Por otra parte es

$$OA = AC - CO = p - r$$

$$OA' = CO - CA' = r - p'.$$
[3]

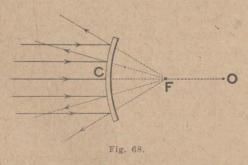
Introduciendo las [2] y [3] en la [1], resulta

$$\frac{p-r}{r-p'} = \frac{p}{p'} \tag{4}$$

que se convierte fácilmente en

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}$$
 [5]

o, puesto, que la distancia focal, que representaremos con f, es igual a la mitad del radio,



$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$
 [6]

IV. Espejos convexos. — En la fig. 68 se hace patente que rayos paralelos al eje principal se reflejan de modo que sus pro-

longaciones se cortan en un punto F que es el foco principal. Este foco es, pues, virtual. La distancia CO es la distancia focal, la cual, también en este caso es igual a la mitad del radio de curvatura.

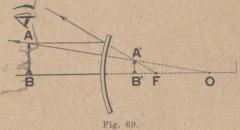
En estos espejos las imágenes son siempre virtuales, como lo patentiza la construcción de la fig. 69.

C. — REFRACCIÓN DE LA LUZ

1. Las leyes de la refracción. — Ya hemos visto en el apartado A de este capítulo, en qué consiste el fenómeno de la refracción.

Se llama ángulo de refracción al ángulo que forma la normal con el rayo refractado.

La experiencia enseña que la refracción obedece a las dos leves siguientes:



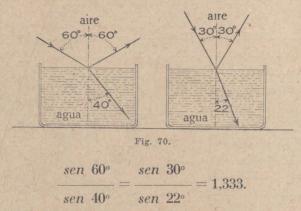
I. El rayo refractado se encuentra en el plano que determinan el rayo incidente y la normal a la superficie en el punto de incidencia.

II. El cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción, es una constante para dos medios dados.

Esa constante se llama *índice de refracción* del segundo medio con respecto al primero, y se la representa con la letra n. Este índice se dice absoluto si el primer medio es el vació o prácticamente el aire. Cuando se dice, simplemente, el índice de refracción de una substancia es tanto, se entiende que es con respecto al aire, esto es, el absoluto.

La primera ley no requiere mayores explicaciones. En el plano citado en ella está también, según sabemos, el rayo reflejado.

En la fig. 70 se han representado las posiciones de los rayos refractados correspondientes a dos rayos incidentes distintos, en la superficie de separación de agua y aire. En el primer caso el ángulo de incidencia es de 60° y el de refracción 40°, y en el segundo el primer ángulo es de 30° y el de refracción 22°. Se tiene:



· Se han tomado, está claro, para los ángulos números redondos.

El índice de refracción del agua es, pues, 1,333.

En la tabla que sigue damos los índices de refracción de varias substancias.

Cuerpo	Indice de refracción
Agua	1.333
Alcohol	1.37
Cloroformo	1.45
Vidrio común	1.5
Topacio	1.62
Diamante	2.42

De un modo general si A y B son dos medios cualesquiera (fig. 71), si se representa con i el ángulo de inci-

dencia y con r el de refracción, la ley de los senos o ley de Snellius se escribe:

$$\frac{sen \ i}{sen \ r} = n \tag{1}$$

donde n, que es una constante para esos dos medios, es el índice de refracción de la substancia B con respecto a la A.

La experiencia enseña, también, que si n1 y n2 son los índices de refracción de los medios A y B respecto al aire, es

$$\frac{sen \ i}{sen \ r} = n = \frac{\overline{n_2}}{n_1}$$
 [2]

A

Fig. 71.

de modo que los senos de los ángulos de incidencia y refracción están

en razón inversa de los índices absolutos de refracción de ambos medios.

Si el medio A fuese agua, p. ejem., y el B vidrio, se tendría, para el índice de re-



1,50 - = 1.13

> La [2] es una generalización de la [1]. Es no-

torio que en ambas expresiones se hace corresponder al aire el índice de refracción uno.

2. Algunos fenómenos debidos a la refracción. — En la fig. 72 se pone de manifiesto cómo se hace visible un objeto e' situado fuera de la línea de visión en el aire, en el fondo de una vasija, si ésta se llena de agua y en la fig. 73 la razón de la apariencia de estar torcido que pro-

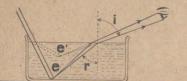


Fig. 73.

duce un bastón sumergido en el agua.

3. Relación entre las velocidades de propagación y los índices de refracción. — Las determinaciones expe-

rimentales han comprobado que las velocidades V_1 y V_2 con que la luz se propaga en dos medios diferentes cualquiera, están en razón inversa de los índices de refracción n_1 y n_2 de los mismos.

. Es decir que

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

de modo que cuanto mayor es el índice de refracción, menor es la velocidad de propagación de la luz.

Si el subíndice 1 corresponde el aire, p. ejem., y el 2 al agua, se tiene

$$V_1 = 300.000 \frac{km.}{seg.}$$
 $n_1 = 1$
 $n_2 = 1.333$

y por lo tanto

$$\frac{300.000}{V_2} = \frac{1.333}{1}$$

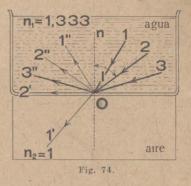
de donde

$$V_2 = \frac{300.000}{1.333} = 225.056 \frac{km.}{seg.}$$

es la velocidad de propagación de la luz en el agua.

4. Reflexión total. — Consideremos el pasaje de la luz de un medio cualquiera, agua, p. ejem., a otro menos refringente, tal como el aire. Ya sabemos que, en tal caso, los rayos se alejan de la normal. En la fig. 74 al rayo inci-

dente 1 le corresponden el rayo reflejado 1" y el refractado 1'; al incidente 2 el reflejado 2" y el refractado 2' que sale rasante a la superficie, es decir, que forma un ángulo de 90° con la normal. A cualquier otro rayo, tal como el 3 que incida bajo un ángulo mayor que el 2, no le puede corresponder, pues, ningún



rayo refractado, porque el ángulo máximo de refracción es en este caso de 90°. Eso quiere decir que de la luz incidente no se refracta parte alguna; que toda la luz va en el rayo reflejado 3". Se habla, por eso, de reflexión total de la luz.

El ángulo l del rayo incidente 2, al cual corresponde el ángulo de refracción de 90°, que es el del rayo 2', se llama ángulo límite. Este ángulo puede calcularse fácilmente mediante la ley de los senos en su forma [2]. En este caso es:

$$i = l$$
; $r = 90^{\circ}$; $n_1 = 1.333$ y $n_2 = 1$

de modo que

$$\frac{sen. l}{sen. 90^{\circ}} = \frac{1}{1.333}$$

y, puesto que sen. 90° = 1, resulta

sen.
$$l = \frac{1}{1.333} = 0.750$$

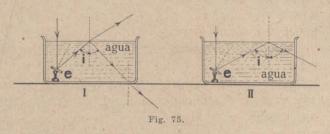
de donde, calculando hasta los minutos,

$$l = 48^{\circ} 35$$
.

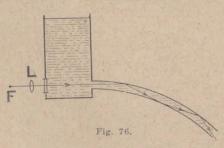
Entre vidrio común (n = 1,5) y aire, el valor del ángulo límite es

$$l = 41^{\circ} 49^{\circ}$$
.

5. Experimentos. — En la fig. 75 está indicado un experimento que no requiere mayores explicaciones. El espejuelo e, girable, permite hacer incidir un delgado haz de



rayos paralelos sobre la superficie de separación de agua y aire bajo ángulos diferentes. Si el agua ha sido enturbiada con unas gotas de una solución de mástique en alcohol, se ve nítidamente la huella de la luz dentro del

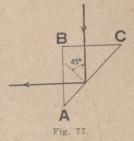


líquido. En la fig. 75 I, el ángulo de incidencia *i* es menor y la fig. 75 II, mayor que el ángulo límite. En este segundo caso toda la luz se refleja.

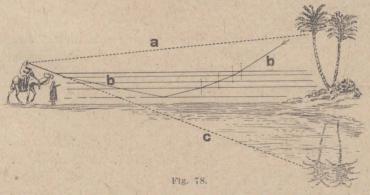
En la fig. 76 está representado un chorro de agua que aparece fuer-

temente iluminado debido a un haz de rayos que se reflejan totalmente en su superficie interior de modo que toda la luz se propaga por dentro del mismo. 6. Prisma de reflexión total. — El prisma de reflexión total es un prisma de vidrio común (n=1,5), por lo general, que tiene un ángulo de 90° y los dos restantes de 45°

(fig. 77). Un rayo de luz que incide normalmente sobre una de las caras menores, como la AB, incide después de penetrar en el vidrio, sobre la superficie AC, bajo un ángulo de 45° y se refleja allí totalmente, pues el ángulo límite entre el vidrio y el aire es, como ya se calculó, de 41° 49'.

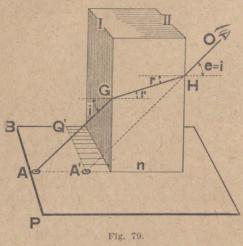


7. Espejismo. — Si el suelo ha sido muy calentado por los rayos solares, las masas de aire próximas al mismo están mucho más calientes que las alejadas. Como el índice de refracción disminuye con la temperatura, si se dividen a las masas de aire en capas por planos horizontales, la



primera de ellas, que está sobre el suelo, tiene un índice de refracción menor que la segunda capa, ésta menor que la tercera y así siguiendo. Un rayo como el b (fig. 78), al pasar sucesivamente de una capa a otra se aleja más y más de la normal hasta que incide bajo un ángulo mayor que el ángulo límite que corresponde a dos capas y se refle-

ja totalmente. Ese rayo b seguirá una trayectoria como la indicada y el viajero ve en la dirección c al objeto.



8. Lámina de caras paralelas. — Un rayo de luz que pasa a través de una lámina de caras paralelas se desplaza lateralmente pero no se desvía, es decir, que el rayo emergente es paralelo al rayo incidente. Eso es lo que se ha representado en las figs. 79 y 80. El rayo AG engendra al rayo refrac-

tado GH y éste al emergente HO, que forma con la normal el ángulo de emergencia e, que es igual al de incidencia i.

Que esto es así, resulta de la ley de los senos, esto es, de la segunda ley de la refracción, pues los dos ángulos r, en G y en H, son iguales por alternos internos y se tiene

$$\frac{sen \ i}{sen \ r} = n$$

y, también,

$$\frac{sen \ e}{sen \ r} = n$$

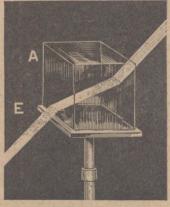
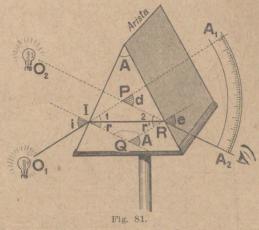


Fig. 80.

donde n es el índice de refracción de la lámina respecto al medio en el cual se encuentra y esas dos igualdades

sólo pueden coexistir si, como se ha dicho, es e=i. El ojo ve, pues, el punto A como si estuviese en A' y una línea como la AQ como si se encontrase en A'Q'.

9. Refracción en el prisma.—A. Marcha de los rayos. Ángulo de desviación mínima. — Supongamos que se tiene un prisma (figura 81), de una substancia transparente en un medio de menor índice de refracción, tal como el aire, p. ejem.



La marcha de un rayo de luz a su través es la indicada en el dibujo, que no requiere mayores explicaciones y

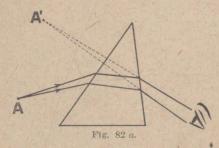


Fig. 82.

que enseña la fig. 82. Las imágenes que da el prisma son virtuales. En la fig. 82*a* A' es la imagen de A.

Se llama ángulo de desviación al ángulo d que forma la dirección del rayo emergente con la dirección del rayo incidente. Ese ángulo d depende del ángulo de incidencia i, hecho que se puede poner de manifiesto de modo muy sencillo. Si

se manda un haz de rayos paralelos de modo que parte de la luz atraviese el prisma (fig. 83), y el resto pase cerca de la arista refringente del mismo, se tendrá sobre una pantalla P, situada normalmente a la dirección primitiva de los rayos, dos regiones luminosas, una M, blanca, y otra N que enseña los colores del espectro. Está claro que d es el ángulo de desviación. Si se gira el prisma lentamente en el sentido que enseña la flecha f, con lo que se



varía el ángulo de incidencia, se observa que N se acerca primero a M y luego se aleja. El ángulo d que corresponde a la posición de N más próxima a M, se llama ángulo de desviación mínima.

Se demuestra teórica-

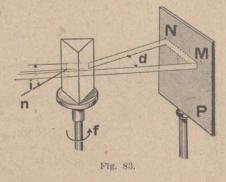
mente y se comprueba experimentalmente que cuando d tiene el valor mínimo, los ángulos de incidencia, i, y de emergencia e, son iguales, es decir:

$$e = i$$

si d = mínimo, en cuyo caso es, también,

$$r=r'$$
.

B. Fórmula del prisma.—Por lo que acabamos de ver, el prisma puede situarse experimentalmente, de modo muy fácil, en posición de mínima desviación, lo que permite, a la vez, deter-



minar el ángulo mínimo d correspondiente. Por otra parte, puede medirse, también, el ángulo refringente A del prisma (fig. 81).

Conociendo el ángulo de desviación mínima d y A puede calcularse el índice de refracción n del prisma. Se tiene

$$n = \frac{sen \ i}{sen \ r}$$
 [1]

$$d = \hat{1} + \hat{2} = i - r + i - r = 2i - 2r$$

$$\hat{A} + \hat{Q} = 2 \text{ rectos}$$

$$Q + 2r = 2 \text{ rectos}$$
[2]

de donde

$$\hat{A} = 2r$$
.

De las [2] y [3] resulta

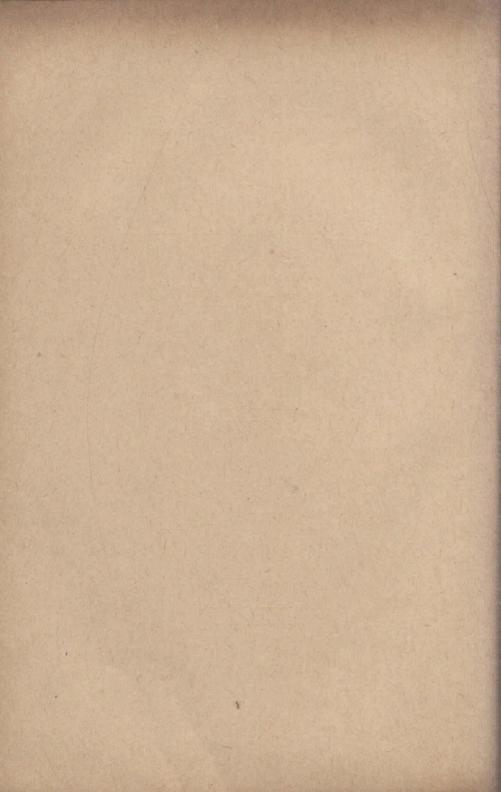
$$i = \frac{d+A}{2}$$
 [4]

$$r = \frac{A}{2}.$$
 [5]

Introduciendo estas dos últimas igualdades en la [1] se tiene, finalmente,

$$n = \frac{sen \frac{d+A}{2}}{sen A/2}.$$

- Karata



CAPITULO VI

LENTES E INSTRUMENTOS ÓPTICOS

A. LENTES. LENTES DELGADAS

1. Definición. Marcha de un rayo de luz a través de una lente. — Se llaman lentes a cuerpos transparentes, como

vidrio, cuarzo, etc., limitados por dos superficies esféricas pulimentadas, que los separan de medios menos refringentes, tales corrections de model aire, p. ejm.

onvexa

Plano Có convexa co

Cóncavo convexa

Existen seis for-

mas distintas de lentes, que son (figs. 84 y 85), la biconvexa, la plano convexa, la convexa - cóncavo (menisco con-



Lentes divergentes

Plano
cóncava
Fig. 85.

Convexo

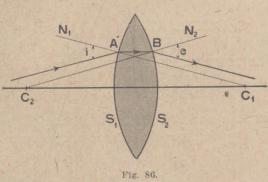
vergente), la bicóncava, la plano cóncava y la cóncavo - convexa (menisco divergente).

Ya veremos que las tres primeras, de mayor

espesor en el medio que en los bordes, son *convergentes* y que las tres últimas, más delgadas en la región central, son *divergentes*.

Se llama *eje principal* de una lente la línea que une los centros de curvatura de sus caras.

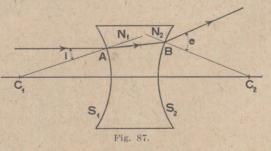
La marcha de un rayo a través de una lente se deter-



mina aplicando la segunda ley de la refracción. Supongamos que la lente se encuentra en el aire, p. ejm. En las figs. 86 y 87, C_1 y C_2 son los centros de curvatura de las superficies esféricas S_1 y S_2 , respectiva-

mente. La normal en el punto A de incidencia, situado sobre S_1 , de un rayo es la línea C_1A , por ser ésta la dirección del radio. El ángulo de incidencia es, pues, i. El rayo se refracta acercándose a la normal, incidiendo sobre la otra

superficie S_2 en el punto B, donde la normal es C_2B . Allí sufre una nueva refracción alejándose de la normal, emergiendo bajo el ángulo e.

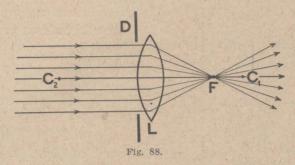


En la lente de mayor espesor en el centro el rayo refractado es *convergente*; en la más delgada en aquella región es *divergente*.

2. Lentes delgadas. — I. Definición. Cuándo a un punto objeto corresponde un punto objeto imagen. — Nos limi-

taremos en lo que sigue a lentes de muy pequeño espesor, es decir, a lentes en las cuales la distancia entre los vértices es pequeña.

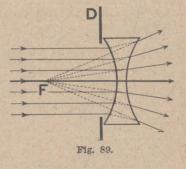
Solamente cuando los rayos de luz pasan por la región central de la lente bajo una inclinación pequeña con el



eje principal todos los rayos que parten de un punto objeto se cortan, después de refractarse, en un solo punto que es la imagen de aquél.

II. Foco. — La experiencia enseña que rayos paralelos

que inciden sobre una lente, paralelamente al eje principal, después de refractarse se cortan, ellos mismos o sus prolongaciones, en un punto de aquel eje que se llama foco principal (figs. 88 y 89). Lo primero acontece en las lentes convergentes (fig. 88), en cuyo caso el foco es real, y lo segundo en



las divergentes, cuyos focos son virtuales (fig. 89).

Cuando los rayos son paralelos entre sí, pero no al eje principal, también se cortan, después de refractarse, en un punto que recibe el nombre de *foco secundario*. El plano que pasa por el foco y es normal al eje principal, recibe el nombre de plano focal.

Debido a lo que terminamos de explicar es que me-



diante una lente convergente puede quemarse un papel o encenderse un cigarrillo mediante los rayos solares (fig. 90).

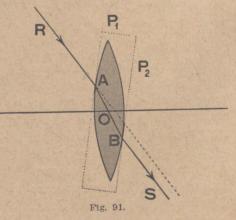
III. Centro óptico. — Si dos puntos A y B de una lente son tales que los planos tangentes P_1 y P_2 a las su-

perficies a que pertenecen son paralelos (fig. 91), un rayo que sigue la trayectoria *RAB* sale en la dirección *BS* paralela a la *RA*. Es decir, que el rayo emergente *BS* es paralelo al incidente *RA*; sólo se desplaza lateralmente,

pues todo sucede como si la refracción se produjese a través de una lámina de caras paralelas P_1 y P_2 .

El punto O en que el rayo AB corta al eje principal se llama centro óptico de la lente.

Si la lente es delgada todo rayo que converge al centro óp-



tico no sólo no se desvía sino que su desplazamiento lateral es muy pequeño y puede despreciarse. En la fig 91a está representado este hecho.

III. DISTANCIA FOCAL. — En las lentes delgadas la distancia focal, que representaremos con la letra f, es la

distancia del foco F al centro óptico O (fig. 92). Está claro que hay un foco de cada lado. Las dos distancias focales son iguales si de ambos lados de la lente se tiene el mismo medio.

IV. Formación de imágenes. La imagen A'_1 de un punto A_1 (fig. 93), está en la intersección de dos cualesquiera de los rayos que partiendo de A_1 se refractan en la lente, pues todos ellos se cortan en un mismo punto que es, precisa-

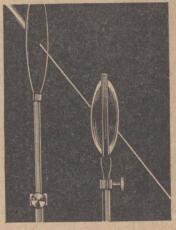


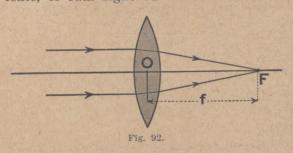
Fig. 91 a.

mente, A'₁. Para determinar este punto débese elegir dos rayos de entre los tres siguientes que son de marcha conocida:

1.º El rayo A_1P paralelo al eje principal, el cual, des-

pués de refractarse, pasa por el foco.

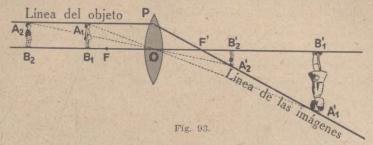
2.º El rayo A_1O que pasa por el centro óptico de la lente, el cual sigue su marcha sin desviarse.



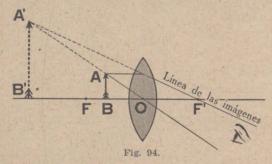
3.º El rayo A₁F, que no ha sido trazado en el dibujo, el cual, después de refractarse, sigue paralelamente al eje principal.

La imagen de A_1B_1 resulta ser $A'_1B'_1$. La de otro objeto del mismo tamaño A_2 B_2 situado más lejos de la lente es

 $A'_2B'_2$, cuyo punto A'_2 está sobre la línea F'P. Esta línea es, pues, la línea de las imágenes. Las imágenes de la fig.



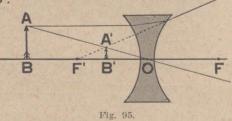
93 son reales porque están determinadas por la intersección de los rayos mismos. Son, además, invertidas.



Si el objeto está situado entre el foco y la lente, la imagen es virtual y derecha. Eso puede verse en la misma fig. 93, pero, para mayor claridad, se ha hecho la

construcción de la fig. 94. La imagen de la flecha AB es la flecha punteada A'B'.

Las lentes divergentes dan siempre imágenes virtuales. En la fig. 95 la imagen de AB es A'B'.



V. FÓRMULA DE LOS FOCOS CONJUGA-

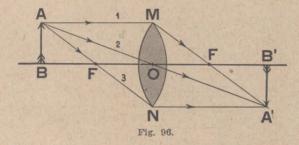
pos. — En la fig. 96, A'B' es la imagen AB y, recíprocamente, si A'B' fuese el objeto, su imagen sería AB. Los puntos B y B', A y A', etc., que se corresponden de ese modo

se llaman focos conjugados. Nos referimos aquí en lo que sigue, en particular, a los focos conjugados B y B'. En el triángulo AMA' se tiene:

$$\frac{OF}{AM} = \frac{OA}{A'A}$$
 [1]

y en el ANA'

$$\frac{OF}{NA'} = \frac{AO}{A'A}$$
 [2]



y sumando esas dos igualdades

$$\frac{OF}{AM} + \frac{OF}{NA'} = 1$$
 [3]

La magnitud OF es la distancia focal f. Representando, además, la distancia AM = BO del objeto a la lente con a y la NA' de la imagen a la lente con b, es decir, escribiendo

$$OF = f$$
 $AM = a$
 $NA' = b$

la [3] se convierte en

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \tag{4}$$

Si el objeto está en el infinito es $a = \infty$, 1:a = 0. Y por lo tanto

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

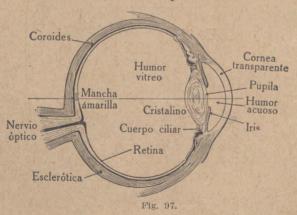
de donde

$$b = f$$

es decir que la imagen se forma en el foco.

В. Ег одо

3. El ojo desde el punto de vista óptico. — I. Descripción. — El ojo humano (fig. 97), está constituído por varias membranas de forma aproximadamente esféricas y con-



céntricas. La membrana exterior, lla-mada escle-rótica, es opaca y resistente y tiene en la parte antérior una abertura circular en la cual se inserta la córnea.

que es transparente y posee una curvatura mayor que la de aquélla. La cara interna de la esclerótica está recubierta por la coroides, la cual se ensancha en la parte anterior formando el cuerpo ciliar, que sostiene al cristalino, cuya forma es la de una lente, y al iris, limitado en la parte anterior por una abertura circular que constituye la pupila.

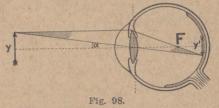
El diámetro de la pupila es variable, aumenta en la obscuridad y disminuye, cuando la luz es muy intensa. Tanto la esclerótica como la coroides tienen en la parte posterior una abertura por la cual penetra el nervio óptico, el cual se extiende luego por la retina que recubre la parte interna del ojo, y que es una membrana de estructura muy compleja y sensible a la luz. La mancha amarilla es la parte de la retina más sensible a la luz. Sobre ella se forman las imágenes de los objetos colocados directamente enfrente del ojo y sobre el eje del mismo.

La cavidad del ojo está dividida por el cristalino en dos partes: una, la anterior, pequeña, que contiene el humor acuoso, y la otra, mayor, que contiene el llamado humor vítreo.

Tanto el humor acuoso como el vítreo son substancias transparentes, lo mismo que la córnea y el cristalino. El índice de refracción del humor acuoso y del vítreo es aproximadamente el mismo e igual a 1,337 (casi como el agua), en tanto que el cristalino está formado por varias capas, siendo el índice de refracción de las capas superficiales menor que el de las capas internas.

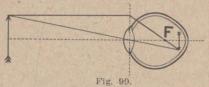
II. Como se comporta ópticamente. — El ojo se comporta como una lente convergente. La imagen del objeto

y (fig. 98) es y'. En el ojo normal esta imagen se forma sobre la retina para lo cual el ojo se "acomoda" de acuerdo a la distancia a que se encuentra del objeto. Si el



cuerpo se aproxima al ojo es necesario que éste se haga más convergente, lo cual se logra sin que intervenga en ello la voluntad, aumentando la curvatura del cristalino. Cuando el objeto se aproxima demasiado a los ojos, llega un momento en que ya no es posible la acomodación, y a esa distancia mínima, para la cual todavía es posible ver con claridad, se le designa con el nombre de *distancia* mínima de visión nítida, que para el ojo normal es de unos 25 cm.

III. Ojo miope e hipermétrope. — En el ojo normal llamado también *emétrope*, la imagen de los objetos lejanos se forma en la retina sin efectuar para ello esfuerzo alguno. Cuando la distancia del objeto es inferior a unos 15 m. es necesario que el ojo se acomode para que la imagen siga produciéndose en la retina, acomodación que



se efectúa en la forma que vimos en el párrafo anterior.

En cambio, en un ojo miope la imagen de un objeto lejano se produce

delante de la retina, debido a que el globo del ojo es en este caso demasiado alargado (fig. 99). El ojo se comporta como un sistema óptico demasiado convergente, por

lo cual la miopía se corrige colocando delante del ojo una lente divergente.

En la hipermetropía, por el contrario, debido a que el ojo es demasiado corto la

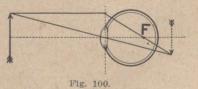


imagen de un objeto lejano se forma detrás de la retina (fig. 100), o sea los rayos convergen menos de lo que debieran, por lo cual para corregir ese defecto es necesario emplear lentes convergentes.

IV. Poder separador. — Se llama poder separador el ángulo que corresponde a la separación mínima a que pueden encontrarse dos puntos a una distancia dada para

que el ojo los vea distintamente. Así, p. ejem., dos puntos distantes entre sí (fig. 101), 2,8 milímetros, situados a 10 metros del ojo se ven bajo un ángulo de 1 minuto.

Si a esa distancia una persona los viese separados, diríamos que el poder separador de su ojo es de 1 minuto.

2.8 mm 1 1 1 10 metros Fig. 101.

V. La sensación de re-Lieve. — La sensación de

relieve es debido a la visión binocular. Si bien ambos ojos ven un mismo objeto, y en esta visión la mayoría de los puntos son los mismos, cada uno de ellos ve, además, lugares del mismo que no ve el otro y a este hecho se debe aquella sensación.

C. Instrumentos ópticos

4. Lente de aumento. — Cuando nos encontramos en el caso de observar un objeto pequeño lo acercamos instintivamente a los ojos, es decir, aumentamos el ángulo bajo el cual lo vemos, ángulo del cual depende su tamaño aparente. Pero está claro que a lo sumo podemos acercarlo hasta el límite de la visión distinta, es decir, a unos 25 centímetros de los ojos.

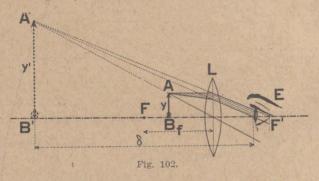
Mediante una lente podemos aumentar mucho más y con mayor comodidad el ángulo antes citado, con lo que el ojo ve el objeto como si fuese mucho mayor.

Si el objeto AB = y (fig. 102), está situado más acá del foco su imagen A'B' = y' es directa y mucho mayor que aquél. La lente aumenta aparentemente el tamaño del objeto, por lo que se dice que es de aumento o que es un microscopio simple.

Está claro que cuanto más cerca esté la imagen y' del ojo, más grande aparece, pero no podemos sobrepasar el

límite de la visión distinta. A esta distancia se tiene, pues, el mayor aumento. Al observar un objeto con una lente, sin advertirlo, movemos a ésta y al ojo hasta encontrarnos en esas condiciones.

Se llama aumento lateral a la relación entre el tamaño y' de la imagen y el y del objeto. No es difícil demostrar



que si δ es la distancia mínima de la visión distinta y f la distancia focal de la lente, se tiene:

$$aumento = \frac{y'}{y} = \frac{\delta}{f},$$

de modo que el aumento es tanto mayor cuanto menor es f. Como δ es alrededor de 25 cm. y f puede determinarse experimentalmente, es fácil obtener el valor del aumento.

5. Microscopio compuesto. — El microscopio compuesto consiste en dos sistemas de lentes, el *objetivo* y el *ocular*, que están representados en la fig. 103, por dos lentes convergentes. El objetivo da del objeto pequeño *AB*, situado en su proximidad, más allá del foco, una imagen real e invertida *A'B'*, que se forma entre el ocular y su foco. El ocular da así de la imagen *A'B'* una imagen virtual *A''B''*.

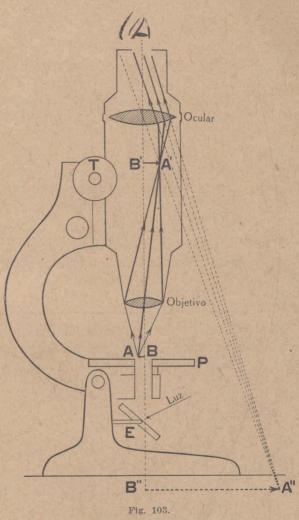
El aumento que produce este dispositivo es tanto mayor cuanto mayores son los aumentos que producen el

objetivo y el ocular.

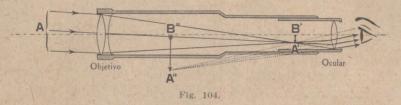
El objeto se coloca sobre la plataforma P que tiene una a bertura anular. Se ilumina desde abajo enviando luz sobre el espejo E.

Para enfocar el microscopio se acerca o se aleja el objetivo, mediante el tornillo T que acciona una cremallera que lleva el tubo que lo sostiene.

6. Anteojos astronómico v terrestre. —



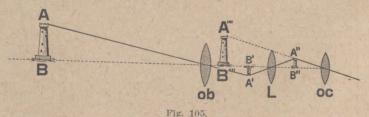
Con estos instrumentos pueden observarse objetos lejanos bajo un tamaño aparente mucho mayor que si se observasen a simple vista. El anteojo astronómico está formado (fig. 104), como el microscopio compuesto por dos sistemas convergentes: el objetivo y el ocular. El objetivo da de un objeto AB muy alejado, que queda fuera de los



límites del dibujo, una imagen real, invertida, A'B', en su plano focal. El ocular, que funciona como una lente de aumento, da de la imagen A'B' una imagen virtual directa A''B''.

Si el foco del ocular está en A'B', es decir, si coincide con el foco del objetivo, la imagen A"B" se forma en el infinito. El ojo ve esa imagen enfocando también al infinito.

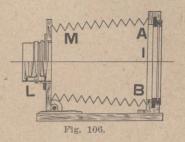
La imagen A"B" que da el anteojo astronómico es invertida lo que no es apropiado cuando se trata de observar objetos situados sobre la tierra. Se construyen, por eso, anteojos terrestres, en los cuales la imagen es directa.



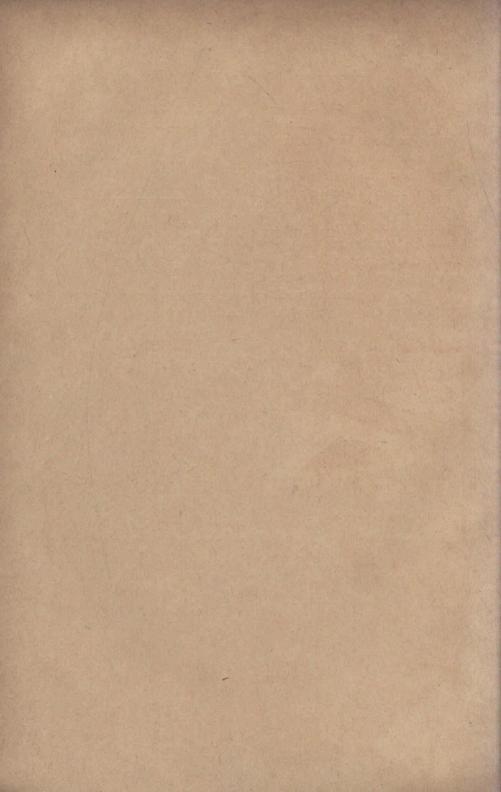
En ellos (fig. 105), de la imagen A'B' producida por el objetivo, una lente L da una imagen A''B'' directa en relación al objeto AB. El ocular da de A''B'' una imagen virtual directa A'''B'''.

7. Máquina fotográfica. — La máquina fotográfica (fig. 106), es una cámara oscura de longitud variable que tiene,

en lugar de un orificio, un sistema convergente L. La imagen de un objeto dado se forma sobre la superficie AB de un vidrio despulido, el cual se acerca o se aleja de la lente L hasta que la imagen se vea con la mayor nitidez. Luego se sustituye ese vidrio despu-



lido por una placa fotográfica y se expone por un tiempo más o menos largo, según la luminosidad del objeto.



CAPÍTULO VII

DISPERSIÓN DE LA LUZ

1. Dispersión de la luz por el prisma. — Si se hace incidir un haz de luz solar o de otro cuerpo sólido incandescente (¹) sobre un prisma (fig. 107) y se reciben los rayos que emergen del mismo sobre una pantalla, se observa

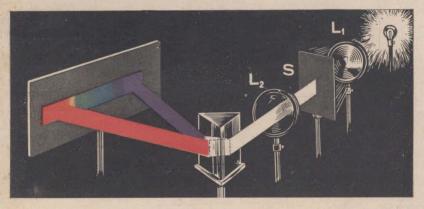


Fig. 107.

sobre ésta un espectro luminoso coloreado. Los colores son: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violado.

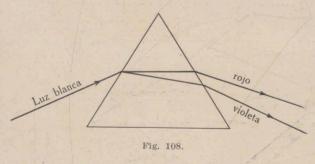
La experiencia enseña que esos colores corresponden a rayos que ya existían en la luz blanca incidente; que el

⁽¹⁾ Puede usarse una lámpara de las que se usan para iluminación con fines fotográficos. Son sumamente luminosas aunque de poca duración. Se disponen como las lámparas comunes a filamento metálico en la red eléctrica de alumbrado.

prisma lo único que ha hecho es dispersarlos.

La dispersión se produce porque el índice de refracción depende del color de la luz, siendo en los cuerpos — en particular en el vidrio — mayor para el violeta que para el índigo, para éste

En la fig. 108 se ha hecho una nueva representación de la marcha de los rayos rojos y violetas, no obstante que esa marcha puede verse, con bastante claridad, en el dibujo anterior.



Si los rayos dispersados por un prisma se hacen refractar en otro, no se obtiene ningún nuevo color, hecho del cual se infiere que la luz blanca está compuesta, exclusivamente, por los siete colores antes citados.

En la fig. 109 está representado el espectro solar. Se advierten en él líneas negras, que se deben a fenómenos de absorción en la atmósfera misma del Sol, y que llevan el nombre de líneas de Fraunhofer.

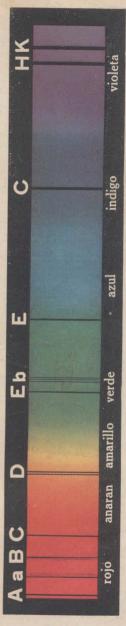


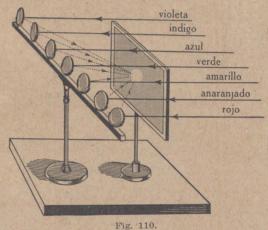
Fig. 109.

Ya veremos que el color es un fenómeno subjetivo. Un rayo rojo y uno violeta, p. ejem., consisten en idénticos procesos oscilatorios, siendo mayor el número de vibraciones por segundo, esto es la frecuencia, en el rayo violeta que en el rojo.

Como las velocidades de propagación están en razón inversa de los índices de refracción resulta que la luz roja se propaga, en un medio que no sea el vacío o el aire, con mayor velocidad que la violeta. En el vacío o prácticamente en el aire, todos los rayos, cualesquiera sean sus frecuencias, es decir sus colores, se propagan con la misma velocidad, es decir, el índice de refracción es la unidad para todos ellos.

2. Recomposición de la luz. — Superponiendo los rayos de los siete colores, obtenidos por dispersión en el prisma, se obtiene nuevamente luz blanca. Esto puede comprobar-

se mediante el experimento que enseña la figura 110. Se sitúan en el camino de cada uno de los haces de luz de los siete colores un espejo que puede girar en torno de dos ejes, uno horizontal y otro vertical.

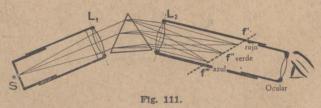


Moviendo los espejos se manda luz de aquellos colores al mismo lugar de una pantalla, obteniéndose allí luz blanca. Se puede decir que se ha hecho la síntesis de la luz blanca así como antes se había hecho su análisis.

- 3. Colores complementarios. Se dice que dos colores son complementarios cuando superpuestos producen la sensación de la luz blanca. Tal acontece con el azul y el anaranjado; con el rojo y el verde azulado; con el amarillo verdoso y el violeta. Esto puede comprobarse con el dispositivo de la fig. 110.
- 4. Espectros de emisión y de absorción. I. El ESPECTROSCOPIO. ESPECTRÓGRAFOS. Mediante la instalación de la fig. 107 se ha proyectado el espectro de la luz que emiten el sol y una lámpara eléctrica a filamento incandescente. Ese espectro es, pues, el de emisión de esos cuerpos (sol, filamento incandescente).

Para el estudio de los espectros de emisión y para el estudio de los de absorción, a que nos referimos más adelante, no basta aquel dispositivo, que es tan sólo de demostración. Para esos fines se construyen aparatos especiales que se llaman espectroscopios cuando la observación se hace a ojo y espectrógrafos cuando se hace fotográficamente.

En la fig. 111 está representado esquemáticamente un aparato de esa especie. En s se encuentra la rendija, que es



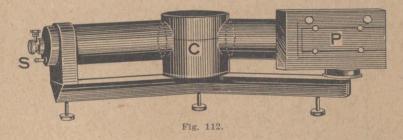
paralela a la arista refringente del prisma y que está en el plano focal de la lente L_1 . Esa rendija se ilumina vivamente con la luz que se desea estudiar. Los rayos que salen de la lente L_1 , son, por lo que acabamos de decir, paralelos entre sí. Todos los rayos inciden, pues, en el prisma bajo el mismo ángulo. Producida la dispersión, los rayos de un mismo color emergen paralelos entre sí. La lente L_2 forma una

imagen de la rendija con los rayos de cada color. En la fig. 111 se han dibujado las imágenes correspondientes al rojo, al verde y al azul.

El foco f' para los rayos rojos está más lejos que el f" de los verdes, el de éstos más lejos que el f" de los azules

y así siguiendo.

Esas imágenes pueden observarse a ojo, mediante el ocular, o se pueden recibir sobre una placa fotográfica situada en la dirección de la línea punteada f'f''. En la fig. 112 está representado un espectrógrafo moderno, cons-



trucción de la casa Zeiss. En S está la rendija, de ancho graduable; las lentes L_1 y L_2 se han indicado mediante trazos de puntos; en C está el prisma (se trata, en realidad, en esta construcción de tres prismas) y la placa fotográfica se coloca en el "chassis" P.

II. Forma de excitación de los cuerpos. — La luz se origina siempre en la materia. A los cuerpos se les puede hacer emitir luz excitándolos de diversas maneras: por la acción del calor, es decir, calentándolos, o eléctricamente, p. ejem. La excitación eléctrica puede producirse de diferentes maneras. Si es un cuerpo sólido pueden construirse con él dos electrodos y producir un arco eléctrico o hacer estallar chispas entre ellos. En ambos casos, además de la acción de la fuerza eléctrica, interviene el calor. Cuando se trata de gases se les encie-

rra a baja presión, en tubos llamados de Geissler, provistos de dos electrodos soldados a través de sus paredes (fig. 113), y se hace pasar por ellos una corriente eléctrica. Es lo que se hace, p. ejem., en el caso de los letreros

luminosos que están constituídos por tubos de aquel tipo con gas Neón solo o mezclado con mercurio. Cuando el vidrio del tubo es blanco y sólo hay dentro de éste Neón, el color de la luz es rojiza, y cuando está mezclado con mercurio, verde. El color azul se obtiene con Neón, contenido en un tubo de vidrio de color.

Si se trata de sales se forman perlas con ella en un hilo de platino y se las coloca en la llama de un mechero de Bunsen. Si es una sal de sodio (cloruro o bromuro, p. ejem.), la luz de la llama se torna muy amarilla y si de una de litio, rojiza. Esos colores corresponden a luz emitida por los átomos de sodio o de litio, respectivamente, con independencia de la sal.

De mayor eficacia es embeber dos barras de carbón bien puro en la solución de la sal y encender un arco o hacer estallar chispas entre ellos.

III. ESPECTRO DE LOS CUERPOS SÓLIDOS INCANDES-CENTES. — Hemos visto que la luz emitida por el sol tiene un espectro entre cuyos extremos visibles, que son el rojo y el violado, hay luz en todas partes por lo que se dice que es *continuo*. Los colores se suceden, por otra parte, unos a otros, no de una

manera brusca, sino mediante un cambio paulatino de matiz. Esto es debido a que el color es un fenómeno subjetivo producido por el tiempo de vibración y-a que la luz solar está compuesta por ondas de longitudes diferentes o lo que es igual por vibraciones de diferentes períodos, entre dos cualquiera de los cuales no hay solu-

ción alguna de continuidad. Es decir, que entre la frecuencia que corresponde al rojo y la que corresponde al violado se encuentran rayos con todas las frecuencias imaginables comprendidas entre aquellas.

Lo mismo acontece con el espectro de la lámpara eléctrica de la instalación de la fig. 107.

Tanto el sol como el filamento de la lámpara eléctrica son cuerpos sólidos incandescentes. La experiencia enseña que en todos los cuerpos sólidos en aquel estado, el espectro tiene ese mismo carácter, es decir, que los cuerpos sólidos incandescentes emiten un espectro continuo.

Ya veremos que la luz consiste en ondas transversales que parten de los cuerpos excitados y que se propagan en un medio imponderable, presente en todas partes, que recibe el nombre de *éter*.

El espacio en que se propaga una excitación luminosa en el tiempo de una oscilación se llama longitud de onda. Las longitudes de onda se expresan en unidades Amgstron, que se representan por la letra Å. Un Amgstron es la cien millonésima parte de un centímetro, es decir

$1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ ctms}.$

El ojo humano sólo puede percibir la luz de ondas cuyas longitudes están comprendidas entre 7.200 y 3.700 unidades Amgstron. Entre esos límites está comprendido el espectro visible del Sol y de la lámpara a que nos hemos referido más arriba. Decimos espectro visible porque se comprueba que el espectro de esos cuerpos, lo mismo que el de otros es de muchísima mayor extensión. Se extiende mucho más allá del violeta hacia ondas más cortas y mucho más allá del rojo hacia las ondas más largas. Se habla por eso de espectros ultravioleta e infrarrojo.

Para obtener el espectro ultravioleta, tanto el prisma como las lentes del espectrógrafo deben ser de cuarzo, pues el vidrio absorbe muchísimo las ondas de longitud menor que 3.500 Å. Con óptica de cuarzo puede llegarse hasta 1.850 Å.

IV. Espectro de gases y vapores enrarecidos. — Los espectros de gases y vapores enrarecidos son de líneas. Es decir, que la luz que emiten proviene de la superposición de ondas entre cuyas frecuencias, que son características del cuerpo que las emite, existen grandes soluciones de continuidad.

En la fig. 144 (ver pág. 99) se han representado los espectros de llama de diversos elementos.

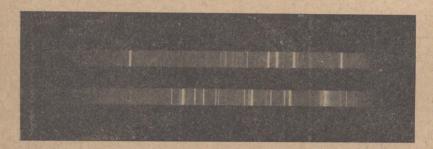


Fig. 115.

En la fig. 115 se da el espectrograma del hidrógeno y del helio excitados en un tubo de Geissler. En todos esos casos se trata de los espectros de las regiones visibles obtenidos con un espectrógrafo de vidrio.

En la 116 la de la lámpara de mercurio, obtenido con un espectrógrafo de cuarzo. La escala da los largos de onda en \mathring{A} .

Esas ondas provienen de fenómenos que se cumplen en el seno del átomo.



Los gases y vapores cuya molécula tiene más de un átomo, emiten también espectros de banda, que ofrecen el aspecto que enseña la fig. 117, que pertenece al nitrógeno (N_2) . Estos espectros provienen de saltos de los átomos en el seno de la molécula y también de saltos en el movimiento de rotación de éstas.

V. Espectros de absorción. — Los cuerpos que nos rodean ofrecen a nuestra vista los más variados colores, no obstante estar iluminados por la misma luz, que es la luz blanca del Sol. Este vidrio es amarillo v este otro es azul. La explicación de estos diferentes comportamientos se pone de manifiesto produciendo la descomposición de la luz mediante la instalación de la fig. 107 y colocando delante de la rendija, sucesivamente, trozos de esos cuerpos. Se verá que el vidrio amarillo deja pasar la luz roja, la amarilla y la verde, v el azul la verde, la índigo y la violeta, de modo que el primero absorbe el anaranjado, el azul, el índigo v el violeta, v el segundo el rojo, el anaranjado, el amarillo, indigo v violeta. Los dos vidrios superpuestos dejan pasar sólo el verde. Ésta es la razón por la cual mezclando pinturas amarilla y azul resulta un color verde.

Fig. 116.

Por eso se habla de espectros de absorción.

En la fig. 118 se dan los espectros de absorción de varios cuerpos en la región visible. En la fig. 119, las bandas de absorción de la sangre humana.



Fig. 117.

Los sólidos, los líquidos y las soluciones absorben la luz en ciertos lugares del espectro pero dentro de intervalos relativamente grandes de largos de ondas; por lo que se habla de *bandas de absorción* como lo hacen notorio los espectrogramas precedentes.

Los gases y vapores enrarecidos tienen, en cambio, espectro de absorción de líneas. Las líneas negras del espectro solar, que se llaman líneas de Fraunhofer, se deben a la absorción de la luz solar por los vapores de sodio de su atmósfera. Las frecuencias que corresponden a las líneas de Fraunhofer son iguales a las frecuencias



Fig. 119.

de algunas de las ondas que emiten los vapores de sodio. Este es un principio general. Las ondas que es capaz de absorber un átomo son algunas de las que el mismo es

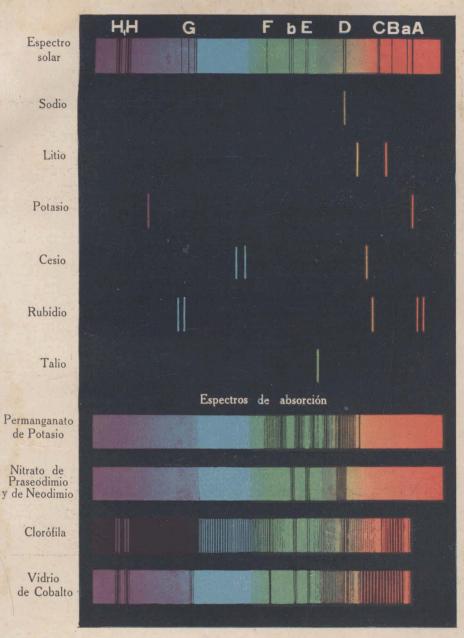


Fig. 114. - Fig. 118.

capaz de emitir. El estudio de los espectros de absorción de los gases y vapores es, por eso de importancia.

VI. Análisis espectral. — Las longitudes de las ondas que emiten los diversos elementos, se conocen hoy con exactitud. Es decir, que se conoce muy bien el espectro de los mismos. Diremos solamente, de paso, para no complicar las cosas, que a un mismo elemento corresponden diversos espectros: el espectro del átomo neutro que se llama espectro de arco y el espectro del átomo ionizado, que se denomina espectro de chispa.

Los espectros de los diversos elementos son por otra parte, inconfundibles entre sí, pues ofrecen diferencias muy grandes. Basta la presencia de un grupo de líneas de un elemento para inferir la presencia del mismo. En esto se funda el análisis espectroscópico, que permite, también, la determinación cuantitativa.

Si aparecieran líneas que no pertenecen a ningún elemento conocido, habría que admitir la presencia de un nuevo elemento. Así descubrió Bunsen el rubidio y el cesio. Por otra parte, pueden revelarse mediante este método pequeñísimas cantidades de una substancia. Las líneas del sodio se hacen presente cuando en una solución existe por centímetro cúbico la tres millonésima parte de un miligramo de ese metal.

También pueden individualizarse las substancias por los espectros de absorción.

CAPITULO VIII

NATURALEZA DE LA LUZ

1. La luz es un fenómeno ondulatorio. — Antes de que se conociese el principio de conservación de la energía era natural que se supusiese al calor y a la luz de naturaleza material. Para Newton, la luz consiste en pequeñísimos corpúsculos materiales, arrojados por el cuerpo luminoso, que se propagan a gran velocidad y que al incidir sobre la retina producen la sensación luminosa. La explicación de la reflexión, la refracción, la dispersión, etc., con esa hipótesis es muy difícil.

Para Cristian Huyghens, contemporáneo de Newton, la luz consiste en un movimiento vibratorio, semejante al del sonido, que partiendo del cuerpo luminoso se propaga con igual velocidad en todo sentido. Puesto que la luz atraviesa los espacios interplanetarios, es forzoso admitir que su propagación no requiere, como el sonido, materia ponderable. Se ha supuesto, por eso, la existencia de una materia imponderable, presente en todos los lugares del universo, lo mismo en los espacios interplanetarios, que en un recinto vacío, que en el interior de todos los cuerpos.

La luz consiste, pues, según la teoría ondulatoria, en un movimiento vibratorio en el éter.

Los fenómenos de polarización, que estudiaremos más adelante, enseñan, por otra parte, que las vibraciones luminosas son transversales.

La propagación del movimiento queda representado por la fig. 15 si se supone que las partículas 1, 2, etc., son de éter. Se llama longitud de onda el camino en que se propaga la excitación luminosa en el tiempo de una oscilación, es decir, en un período. La longitud, p. ejem., de una de las ondas de la luz amarilla del sodio es, en números redondos.

$$\lambda = 5890 \text{ Å}.$$

siendo, como ya sabemos, una unidad Amgstron (1 Å), la cien millonésima parte de un centímetro (10-8 cm.)

Puesto que la velocidad c de la luz es de 300.000 km/seg. = 3.10^{10} cm/seg. y que

$$\lambda = cT = \frac{c}{n},$$

donde T es el tiempo de una oscilación y n el número de oscilaciones por segundo, se tiene

$$n = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.10^{10} \text{ cm/seg.}}{5890 \cdot 10^{-8} \text{ cm.}}$$

es decir, en números redondos,

$$n = 5.1 \cdot 10^{14}$$

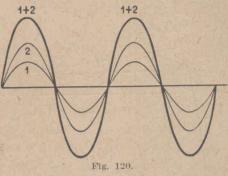
vibraciones por segundo.

2. Fenómenos de interferencia. — I. Generalidades. — Que la luz es un proceso vibratorio, se comprueba por los fenómenos de interferencias. Si en una misma dirección se propagan en el éter dos ondas luminosas, la onda resultante se obtiene por superposición, esto es, las elongaciones de la onda resultante están dadas por la suma de las elongaciones de aquéllas.

Nos referimos en lo que sigue a ondas de igual longitud.

En la fig. 120, las dos ondas, 1 y 2, tienen amplitudes diferentes; pero los sentidos de las elongaciones correspondientes a todos los puntos son iguales: cuando la onda

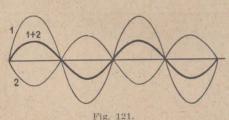
1 hace mover a un punto hacia arriba, la 2 lo hace mover hacia arriba también. Se dice, por eso, en tal caso, que la diferencia de fase o de marcha es nula. Lo mismo sucedería si una de las ondas fuese desplazada con respecto a la



otra en un número entero de largos de onda, en cuyo caso la diferencia de marcha sería de 1, 2, 3, etc., largos de onda.

La onda resultante tiene mayor amplitud que las ondas componentes; la luz de la onda resultante es más intensa que la de cada una de las componentes.

En el caso de la fig. 121, la diferencia de marcha es de medio largo de onda, pues en esa longitud, hay que

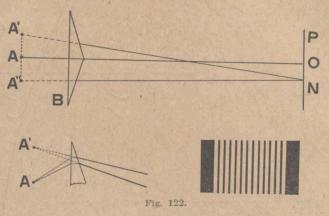


desplazar una onda con respecto a la otra para que los sentidos de las elongaciones coincidan en todas partes.

La onda resultante es de menor amplitud

que las componentes, es decir, la luz de aquélla es menos intensa que la más intensa de éstas. Si las amplitudes de las ondas 1 y 2 fuesen iguales, la amplitud de la onda resultante sería nula. Se tendría en ese caso el hecho de que luz más luz da oscuridad. Para que esto suceda efectivamente, la luz de ambas ondas debe provenir del mismo foco.

II. Interferencias con el biprisma de Fresnel. — El biprisma de Fresnel (fig. 122), tiene un ángulo muy obtuso. En la instalación, frente a él, paralelamente a sus aristas refringentes, se encuentra una rendija A intensa-



mente iluminada. Cada prisma da una imagen de A, lo que hace notorio la construcción de uno de los dibujos. Esas imágenes son A' y A".

Los rayos que se superponen a la derecha del biprisma pueden considerarse provenientes de A' y A". Estos focos virtuales tienen siempre la misma fase de vibración, por lo que se dice que son coherentes, puesto que, como dijimos, son imágenes de un mismo foco, del A.

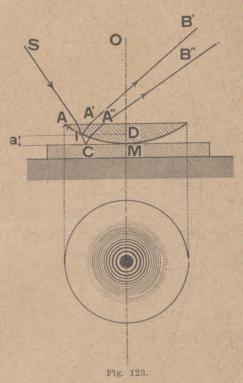
En un punto cualquiera N de la pantalla P se observa, pues, la superposición de los rayos de camino A'N y A''N. Si operamos con luz menocromática, de sodio, p. ejem., cuando la diferencia de aquellos caminos es $\lambda/2$, $3\lambda/2$, $5\lambda/2$, etc., los rayos se anulan en N y se tiene allí una franja negra de dirección paralela a la rendija A. Cuando la diferencia es O, λ , 2λ , 3λ , etc., se refuerzan. Está claro, entonces, que se tendrá sobre la pantalla, a uno y otro lado de O, donde la luz se refuerza, porque la diferencia de camino entre A'N y A''N es allí nula, franjas brillantes

equidistantes, separadas por franjas oscuras, lo que está representado en la figura.

III. Los anillos de Newton. — Si se sitúa una lente plano convexa sobre una lámina de vidrio de caras pla-

nas y paralelas, como enseña la fig. 123, queda entre aquélla y ésta un espacio de aire cuyo espesor crece del punto de contacto *M* hacia afuera.

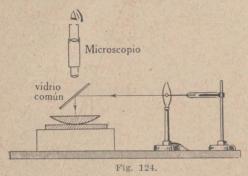
De un ravo incidente SA, se generan, entre otros, los dos rayos IA'B' v CA"B" de los cuales el primero se ha reflejado en el punto de la superficie convexa de la lente y el otro en el punto C, que está frente a I. sobre la cara interna de la lámina. El segundo ravo ha recorrido, pues, un camino de mayor longitud que el pri-



mero, siendo la diferencia igual a dos veces la distancia entre I y C.

Si en lugar de un rayo se tiene un haz, como sucede al hacer el experimento, se tendrán gran número de pares de rayos tales como *IA'B'* y *CA"B"* cuya diferencia de camino será el doble del espesor *IC*, donde *IC* tendrá valores diferentes para los diversos pares de rayos. En los lugares

donde la diferencia de marcha de los rayos sea O, λ , 2λ , 3λ , etc., la luz se reforzará y donde sea $\lambda/2$, $3\lambda/2$, $5\lambda/2$,



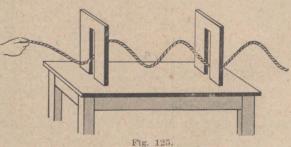
etc., se anulará (1).

Por la simetría de la instalación mirando desde arriba, se verán círculos brillantes con centro en el punto M de contacto separados por círculos oscuros. El fenómeno puede observarse de modo

magnífico con elementos fácilmente asequibles, pues basta, como indica la fig. 124, un microscopio de poco aumento, una lente plano convexa, una lámina de vidrio, un mechero de gas y cloruro de sodio para hacer una perla.

3. Fenómenos de polarización. — Los fenómenos de polarización demuestran que las ondas luminosas son trans-

versales, es decir, que las partículas de éter vibran perpendicularmente a la dirección de propagación del rayo.



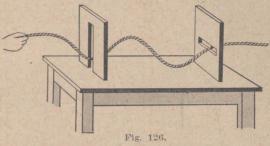
Para hacer más accesible lo que explicaremos a continuación, consideremos un experimento mecánico, que está indicado en las figs. 125 y 126. Si la cuerda vibra transversalmente, su movimiento oscilatorio se continúa a través de la segunda rendija, cuando ésta es paralela a la pri-

⁽¹⁾ Por el simple fenómeno de la reflexión se produce una diferencia de marcha de $\chi/2$. No ahondamos en esto para no complicar la exposición.

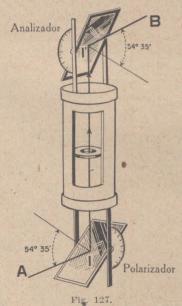
mera, lo que no sucede si le es perpendicular. Es evidente que si la cuerda vibrara longitudinalmente, las oscilaciones

se propagarían a todo lo largo de ella tanto en el primer caso como en el segundo.

Pasemos ahora a un caso óptico. Si se tienen



dos espejos de vidrio común en las posiciones que enseña la fig. 127, un rayo de luz que reflejándose en el espejo de abajo, p. ejem., incide en el otro, se refleja en él si su

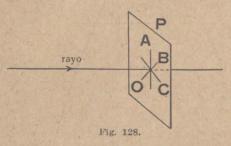


plano de incidencia es paralelo al del primer espejo. En cambio, si esos planos son ortogonales, el segundo espejo no refleja la luz que incide sobre él.

Ese fenómeno sólo es explicable si las vibraciones luminosas son transversales. En un rayo de luz natural, es decir, en un rayo que no haya experimentado ni reflexiones ni refracciones, las partículas de éter vibran transversalmente al rayo de modo que en un intervalo finito de tiempo todas las direcciones del espacio están igualmente representadas. En un instante, la dirección de vibración en un punto O será (fig. 128),

OA, luego OB, p. ejem., más tarde OC. Las direcciones, siempre normales al rayo, se suceden caprichosamente,

según las reglas del azar, como se dice. Esto es debido a que la luz se origina siempre en materia ponderable y en ésta los fenómenos que dan origen a la luz provienen de cambios en el seno de las moléculas o de los átomos, cuyo



número es muy grande.

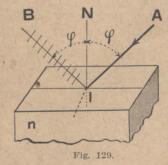
En la luz reflejada, en cambio, las cosas suceden de otro modo. Para cierto ángulo de incidencia φ (fig. 129), en el rayo reflejado, las direcciones de vibración de las partículas de éter,

son normales al plano de incidencia, es decir, que las vibraciones se cumplen en una sola dirección. Un rayo así se dice rectilíneamente *polarizado*.

Está claro que si ese rayo polarizado incide sobre otra superficie reflejante bajo un ángulo también igual a φ , dará lugar a un rayo reflejado únicamente si en éste las

vibraciones pueden ser normales al plano de incidencia. Esto sucede si los planos de incidencia son paralelos. Cuando son perpendiculares entre sí no puede existir rayo reflejado, como enseña la experiencia.

Por otra parte, el rayo reflejado está totalmente polarizado, en la forma que acabamos de



ver, cuando el ángulo de incidencia φ es tal que se cumple la relación

tang.
$$\varphi = n$$

donde n es el índice de refracción del cuerpo reflejante con respecto al aire.

CAPITULO IX

MAGNETISMO

A. HECHOS FUNDAMENTALES

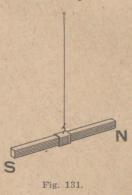
1. Imanes naturales y artificiales. Polos. — Si un trozo de hierro o de mineral de hierro tiene la propiedad de atraer

a otros trozos de hierro se dice que es un imán. La magnetita, nombre que se da en mineralogía a una piedra constituída por



Fig. 130.

óxido de hierro (Fe₃ O₄), es un *imán natural*. Durante mucho tiempo se supuso que tal propiedad provenía de



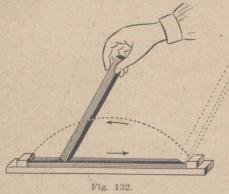
la existencia de dos flúidos que se denominaban magnéticos. La experiencia hizo notorio que con tal suposición no era posible explicar todos los fenómenos de la imantación, de suerte que al decir magnetismo se hace referencia hoy día solamente a las propiedades magnéticas y no al o a los agentes cuya existencia parece palpitar en la palabra.

Si se adentra un imán en limaduras de hierro y luego se le extrae,

se observa que éstas se adhieren sobre todo en dos lugares a los cuales se les da el nombre de polos. La fig. 130

enseña que los polos de una barra imantada se encuentran hacia los extremos.

Si se suspende una barra imantada de un hilo, en la forma que enseña la fig. 131, y se la abandona a sí misma,



cumple oscilaciones que se van amortiguando y queda por fin orientada, señalando una dirección próxima a la nortesur.

Se denomina polo Norte del imán el polo que señala ese rumbo y Sur al otro.

Una barra de ace-

ro se convierte en un imán si se desliza sobre ella uno de los polos de otro imán (fig. 132). Como veremos, una barra semejante se imanta mejor si se le sitúa en el interior de un solenoide por el cual se hace fluir una corriente eléctrica.

2. Acciones recíprocas. — Si a uno de los polos de un imán suspendido como en el de la figura anterior se le

acerca el polo del mismo nombre de otro imán se advierte en seguida que entre ambos actúa una fuerza repulsiva; lo opuesto acaece si los polos son de diverso nombre (figs. 133 y 134). Es decir que los polos



Fig. 133.

del mismo nombre se repelen y polos de diversos nombres se atraen. La orientación de un imán suspendido proviene de la acción que sobre él ejerce la tierra, que es un inmenso imán.

3. Las acciones magnéticas se ejercen a través de todos los medios. — La acción que un imán ejerce sobre otro, una

aguja, p. ejem., se manifiesta a ojos vistas con la misma intensidad si se interpone entre ellos láminas, cualquiera sea el espesor de las mismas, de las variadas sustancias (fig. 135), tales como mármol,



cobre, vidrio, zinc, etc. Existen algunas excepciones, tales como el hierro, el níquel y el cobalto, p. ejem. Si la lámina

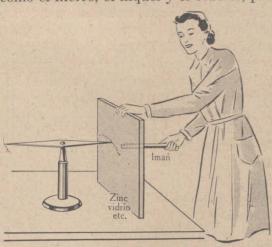


Fig. 135.

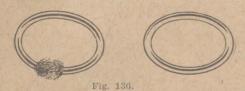
de hierro es de cierto espesor, se advierte un debilitamiento notable de la acción.

También a través del vacío se ejercen las acciones magnéticas.

4. La imantación y la existencia de polos.

— En el caso

de una barra imantada, las fuerzas magnéticas que provienen de los polos se hacen ostensibles en el espacio circundante y de la existencia de esas fuerzas inferimos que la barra se encuentra en un estado particular, esto es, *imantada*. La imantación no va siempre acompañada de la existencia de polos. Así, p. ejem.,



un toroide de hierro puede imantarse (fig. 136), pasando el polo de un imán sobre él siempre en el mismo sentido, sin que aparezcan polos,

lo que se comprueba adentrándolo en limaduras de hierro. Si luego se corta en un punto cualquiera, aparecen, en seguida, en la cortadura polos opuestos, lo que demuestra, a posteriori, la existencia de una imantación. Las fuerzas magnéticas estaban pues, confinadas dentro del anillo.

De ese hecho, puede inferirse, que los polos aparecen en los lugares donde la fuerza magnética pasa de un medio a otro. Podemos adelantar que también aparecen polos, sin que exista discontinuidad de la materia, cuando la fuerza magnética varía de un lugar a otro dentro del mismo cuerpo.

5. Magnetismo inducido. — Si se acerca un imán (fig. 137), a un trozo de hierro, una barra, p. ejem., se advierte

la existencia de una fuerza de atracción entre ambos. Lo que ocurre es que el trozo de hierro es imantado por las fuerzas



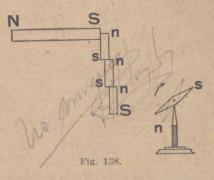
magnéticas del imán. Se dice que el trozo de hierro se imanta por influencia y de su magnetismo se dice que es inducido. Con el auxilio de una aguja magné-

tica puede comprobarse que frente al polo del imán aparece en la barra un polo opuesto y en el otro extremo el del mismo signo.

Si la barra es de hierro dulce, la imantación desaparece casi por completo si se aleja el imán inductor; si

es de acero perdura una imantación apreciable.

Una barra de hierro imantada por inducción puede imantar a su vez por inducción a otras barras no sólo por frotamiento, sino también sin contacto alguno, lo que puede hacerse notorio por el experimento que indica la fig.

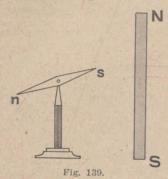


138. Los pequeños trozos de hierro han ido precipitándose hacia el imán o el trozo precedente.

6. Imanes quebrados. A todo polo corresponde siempre un polo opuesto de la misma fuerza. — Si se corta una barra imantada, una aguja, p. ejem., se observa que cada uno de los trozos obtenidos es un imán con sus dos polos, lo cual prueba que en la cortadura han aparecido dos polos opuestos. Si se repite, sucesivamente, la misma experiencia con los imanes que así se van engendrando, se advierte siempre el mismo hecho: que cada trozo es un imán.

Que los dos polos de un imán son de la misma fuerza lo prueba el hecho de que una barra de hierro pesa lo mismo antes que después de imantada. Las fuerzas que la tierra aplica sobre los dos polos de un imán, son, pues, iguales y opuestas, y siendo iguales las fuerzas deben serlo las fuerzas de los polos. Como experiencia de curso, comprobatoria de ese aserto, puede realizarse la que repre-

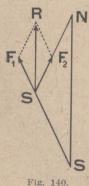
senta la fig. 139. Un imán está situado verticalmente de modo que su punto medio queda a la misma altura que uno de los polos, el s, de una pequeña aguja imantada.



N Este polo s equidistará, pues, de los del imán. Las fuerzas que actúan sobre ese polo no determinan un movimiento en el plano horizontal sino, solamente, una giración alrededor de un eje horizontal. La fuerza resultante R es. por lo tanto, vertical, lo que demuestra que las fuerzas F_1 v F_2 (fig. 140), son exactamente iguales, de lo que se infiere que las

fuerzas de los polos del imán también lo son. Usamos aquí la frase fuerza de los polos en el sentido vulgar.

7. Imanes moleculares. — El experimento anterior hace pensar que prosiguiendo la división de una barra imantada, indéfinidamente, se llegará a tener imanes infinita-



mente pequeños y que la imantación responde a fenómenos que se manifiestan en el seno mismo de la molécula; que los imanes moleculares serían los imanes elementales. Los hechos de que la imantación

de una barra de hierro crece primero rápidamente v luego tiende len-

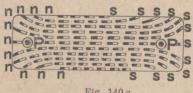


Fig. 140 a.

tamente a un valor límite, máximo, y que si se le calienta más allá de cierta temperatura no es posible imantarla, corroboran ese modo de ver.

Imantar una barra de hierro es (fig. 140 a), orientar sus imanes elementales, ya existentes. Cuando éstos están totalmente orientados, se logra la máxima imantación, es decir, la saturación. Si se la calienta aumenta la agitación térmica de esos imanes, lo que produce la desimantación.

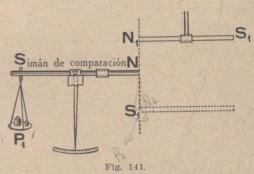
B. LEY DE COULOMB. CAMPO MAGNÉTICO

8. Ley de Coulomb. — La intuición conduce a suponer que en los lugares llamados polos del imán existe un algo que origina las fuerzas magnéticas. Llamaremos a ese algo masa magnética. Ya sabemos, por otra parte, que el magnetismo no es una substancia.

Las masas magnéticas de los polos de dos o más imanes se pueden comparar, lo que es realizar una medida, por las fuerzas que aplican sobre uno de los polos de un tercer imán a la misma distancia.

Esas fuerzas pueden determinarse con el auxilio de una balanza en la forma que indica la fig. 141, la cual no

requiere mayores explicaciones. La fuerza que el polo N_1 de cierto imán ejerce sobre el polo N del imán de comparación está medida por el peso P_1 que es menester ubicar en el otro platillo para



que la balanza conserve su cero. Sea P_2 el peso con que se compensa la acción que ejerce sobre el mismo polo N el polo N_2 de otro imán situado en la posición del polo N_1 .

La experiencia enseña que la relación entre las fuerzas P_1 y P_2 , que esos dos polos N_1 y N_2 ejercen sobre un

tercer polo, es independiente de éste y de la distancia elegida, lo que demuestra que las fuerzas P_1 y P_2 están entre sí como magnitudes que son propias de los imanes N_1 y N_2 .

Esas magnitudes propias son las masas magnéticas, que representaremos con m_1 y m_2 . Escribiremos, pues:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{P_1}{P_2}$$
 [1]

Es decir, que las masas magnéticas de dos polos están entre sí como las fuerzas que ejercen a igual distancia sobre un polo de un tercer imán.

Implicitamente se ha supuesto que las acciones provenientes de los polos restantes de los imanes son despreciables, condición que se satisface con barras imantadas de buena longitud.

Por ese método es posible comprobar que los dos polos de un imán poseen iguales masas magnéticas, pero de diferente signo.

Coulomb dedujo experimentalmente, que la fuerza con que se atraen o rechazan dos polos es proporcional al producto de sus masas magnéticas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Si m_1 y m_2 son las masas y r la distancia, esa ley se escribe así:

$$F=\pmrac{m_1\,m_2}{r^2},$$

donde F es la fuerza, que será de atracción si las masas son de diferente signo y de repulsión si son de signo igual. El signo menos corresponde, entonces, a la atracción y el más a la repulsión.

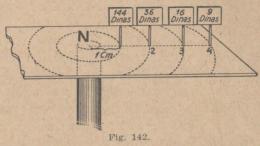
Si las dos masas magnéticas son iguales, es decir, si $m_1 = m_2 = m$, se tiene

$$\mathbf{m} = r \sqrt{F}$$

expresión que permite definir la unidad de masa magnética, pues si r=1 cm. y F=1 dina es m=1.

Un polo tiene, pues, una masa magnética igual a la uni-

dad si repele a otro igual situado a un centimetro de distancia con la fuerza de una dina. En la fig. 142 se in dican las fuerzas en dinas que ejerce sobre



la unidad de masa magnética un polo cuya masa es de 144 unidades a 1 cm., 2 cm., 3 cm., etc., de distancia.

9. Experimentos de curso. — Como experimentos de curso, comprobatorios del contenido de esa ley, son recomen-

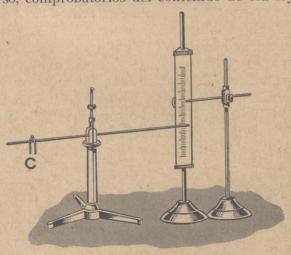


Fig. 143.

dables los siguientes. Supongamos que se tienen, por lo menos, dos agujas idénticas del mismo material. igualmente imantadas y, además, otra tercer barra imantada. Esté ésta montada (fi-

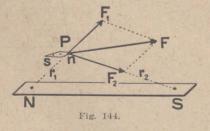
gura 143) de suerte que pueda girar alrededor de un eje horizontal y de modo que, mediante un fiel, se reconozca una posición determinada que se toma como cero. Si se sitúa enfrente, como indica la figura, una de las agujas, la acción entre los polos hará girar aquélla, pero mediante un caballete C es posible restituir la barra a su posición primitiva.

Si en lugar de una aguja se sitúan dos juntas, con los polos homónimos superpuestos, se advierte que, para la misma distancia, el momento necesario para mantener la barra en la posición cero es el doble, lo que prueba que la fuerza total que aplica sobre el polo de la barra, proveniente de dos polos juntos de las agujas, es el doble que la fuerza que proviene de uno solo.

Si la distancia r se reduce a la mitad, o a la tercera parte, los momentos necesarios para restituir el sistema girante a su posición se hacen cuatro veces, nueve veces, etc., mayores.

Implícitamente se ha supuesto que las fuerzas provenientes de los otros polos son despreciables, condición que se cumple con mucha aproximación, si se eligen barras y agujas suficientemente largas.

10. Campo magnético. — I. Intensidad. — Todo espacio en el cual se manifiestan fuerzas magnéticas se denomina campo magnético. Un imán tiene su campo magnético y



lo mismo, como veremos, una corriente eléctrica.

Si se tiene un imán (fig. 144), y en el punto P de su vecindad el polo norte n de un imancillo, de una pequeña aguja, por ejemplo, el polo Norte de

aquél lo rechaza con cierta fuerza F_1 , en la dirección de r_1 y el Sur lo atrae con la fuerza F_2 en la dirección de r_2 , fuerzas que están dadas por la ley de Coulomb. La resul-

tante F de las fuerzas F_1 y F_2 representa la fuerza que aplica el campo del imán en el punto P al polo Norte n situado en él. Si este polo tuviese la unidad de masa mag-

nética, F sería la intensidad del campo magnético del imán en P.

En general, la intensidad de un campo magnético en un punto P está dado en magnitud, dirección y sen-



tido por la fuerza que actúa sobre una unidad de masa magnética norte supuesta en el punto. Cuando la fuerza es una dina, se dice que la intensidad del campo es un Gauss.

Si el imancillo supuesto en P es muy pequeño, el polo



Sur del mismo está muy cerca del polo Norte y sobre él actuará una fuerza igual y opuesta a la F que actúa sobre aquél.

II. Líneas de fuerza. — Acabamos de ver que sobre los dos polos de un imancillo muy pequeño situado en un punto cualquiera de un campo magnético obran dos fuerzas iguales y opuestas. Está claro que el imancillo no

girará únicamente cuando la línea que une sus polos esté en la dirección de la fuerza F que le aplica el campo (figuras 145 y 145 a).

En la posición de reposo la agujilla señala, pues, la dirección de la fuerza del

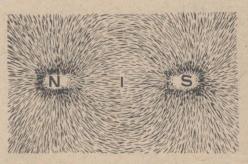


Fig. 146.

campo magnético. Esto permite la obtención experimental de las líneas de fuerza. Entiéndese por línea de fuerza una línea tal que la tangente en una cualquiera de sus puntos da la dirección de la intensidad del campo magnético en el mismo punto.

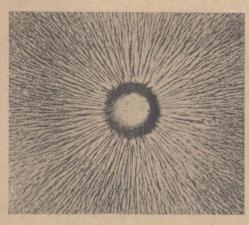


Fig. 147.

Limaduras de hierro desparramadas sobre una pantalla de papel, situada encima de un imán, se orientan bajo la acción de éste — golpeando suavemente el marco de la pantalla — el cual por inducción las imanta. Se obtienen de ese modo los llamados espectros magnéticos.

Las figuras 146, 147, 148, 149 y 150, enseñan la distribución de las líneas de fuerza en diferentes casos.

A lo largo de una cualquiera de las líneas de fuerza las limaduras están imantadas de modo que polos de diferente nombre son vecinos (figs. 151 y 151 a), de suerte que existe una atracción entre ellos. Como los

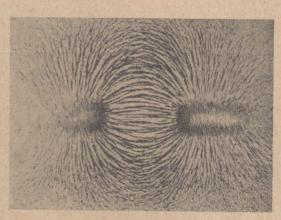


Fig. 148.

imancillos se suceden sin interrupción entre los polos de los imanes, está claro que a lo largo de la línea de fuerza existe una tensión. Si la línea va de un polo a otro del mismo imán la tensión no tiene posibilidad de hacerse

ostensible en un movimiento.

Eso acaece en cambio, si los polos no pertenecen al mismo imán como en el caso de la fig. 148; si se disminuye suficientemente el roce que se opone al movimiento de

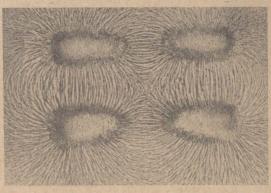


Fig. 149.

uno cualquiera de los imanes, ese imán se precipita en

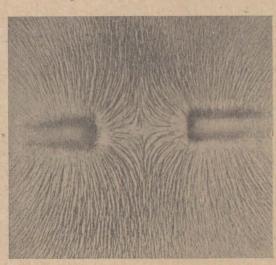


Fig. 150.

seguida sobre el otro, por obra de la tensión de las líneas de fuerza.

Los imancillos de dos líneas
de fuerza vecinas tienen los
mismos sentidos,
de suerte que se
ejerce entre ellos
una acción repulsiva; direque, entre líneas
mos, por esto,
de fuerzas vecinas del mismo

sentido actúa una fuerza de repulsión. Esto se hace notorio en el espectro magnético de la fig. 150. La repulsión entre

dos polos del mismo nombre no es sino trasunto de esa fuerza de repulsión entre las líneas. Difícil es concebir que las fuerzas magnéticas nacen en un lugar al situar



en él un imán o una limadura de hierro, sino que, por el contrario, se impone a nuestra inteligencia el pensamiento de que la acción sobre un imán o sobre una limadura de hierro no es sino trasunto de fuerzas ya existentes; los espectros no son sino

la manifestación de esas fuerzas. Cualquiera sea, pues, el medio que rodea a un imán, entre los que contamos el vacío, existe un estado de tensiones, que, para satisfacer

nuestra intuición, le daremos por soporte al éter. Esas tensiones constituyen el campo magnético del imán. Esta representación de las fuerzas magnéticas se debe a Faraday.



Del hecho de que cortando un imán se engendran dos imanes, siendo opuestos los polos en la cortadura se infiere que las líneas de fuerza se continúan dentro del imán.

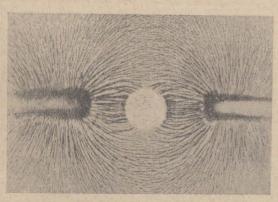


Fig. 152.

Es un carácter esencial del campo magnético el de que sus líneas de fuerza son siempre cerradas.

11. El hierro como conductor de las líneas de fuerza.—Si en un campo magnéti-

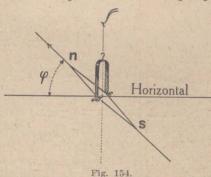
co cualquiera, en el de dos polos de nombres contrarios de imanes diferentes, p. ejem., se sitúa un trozo de hierro dulce (fig. 152), se advierte que las líneas de fuerza toman una nueva distribución. Todo parece ocurrir como si el trozo de hierro, que en este caso es un disco, brindase un camino de menor resistencia, es decir, como si fuese mejor

conductor para las líneas de fuerza. Imaginamos que el proceso consiste en una conversión de éstas hacia el hierro a fin de establecerse por el interior de éste, en la forma que enseña la figura. Es notorio, por la ausencia de limaduras, que en



Fig. 153.

la parte exterior lateral disminuye la fuerza magnética, la cual se incrementa, en cambio en los extremos del diámetro paralelo al campo primitivo. El fenómeno, es



mucho más complicado y sólo puede estudiarse con los recursos de la matemática superior.

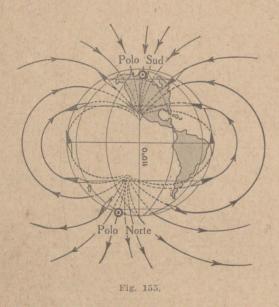
12. Campo magnético terrestre: polos, declinación e inclinación. — Ya vimos en el número 1 de este mismo capítulo que si se suspende una barra

imantada de un hilo o, lo que es lo mismo, si se sitúa una aguja (fig. 153), de modo que pueda girar en torno a un eje vertical, cumple oscilaciones que se extinguen lentamente quedando, por fin, en reposo señalando una dirección próxima a la norte-sur.

El ángulo α que forma con esa dirección, se llama declinación.

Para conocer la dirección exacta de la fuerza magnética terrestre en un lugar dado, es necesario suspender la aguja de modo que pueda girar no sólo alrededor de un eje vertical sino, también, en torno a un eje horizontal. Eso se logra con la suspensión de la fig. 154.

Si, como suponemos, el eje horizontal pasa por el centro de gravedad de la aguja, la dirección de ésta, en



la posición de reposo da la dirección de la fuerza magnética terrestre. El ángulo φ que forma la aguja con la horizontal, se llama *incli*nación.

En la fig. 155 se ha representado el gran imán que es la tierra con sus líneas de fuerza y sus polos.

El Polo Sur magnético tiene la longitud 97° O y

la latiud 70°, y el *Polo Norte magnético*, la longitud 154° E y la latitud 72° S.

Es notorio que una aguja imantada suspendida como indica la fig. 154 en el ecuador magnético, se situará en un plano horizontal, mientras que en los polos quedará vertical.

C. Comportamiento de materiales en el campo magnético

13. Cuerpos ferro, para y diamagnéticos. — La experiencia enseña que el hierro es enérgicamente solicitado por un imán. Eso es debido a que el hierro se imanta fuertemente. Lo análogo, aunque en menor grado, sucede con el níquel y con el cobalto. Estos cuerpos que se imantan fuertemente reciben el nombre de ferromagnéticos.

Para observar lo que sucede con otros cuerpos, no basta un imán permanente, es menester recurrir a un

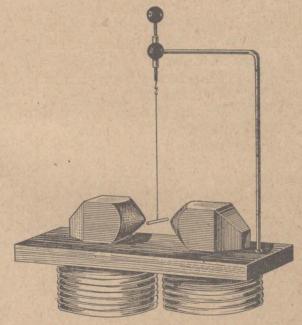
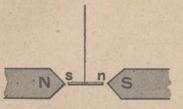


Fig. 156.

electroimán, con el cual puede crearse un campo magnético muchísimo más intenso que el de aquél.

Un trocito cilíndrico de hierro, cobalto o níquel suspendido en la forma que enseña la fig. 156, oscila vivísima-

mente en el campo del electroimán, quedando al fin en reposo en la posición que enseña la fig. 156 a. Frente al polo Norte del electroimán se produce un polo sur en la



Cuerpos ferro y para magnéticos Fig. 156 a.

barrita y frente al Sur el Norte.

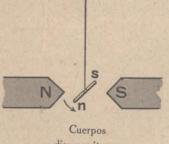
Lo análogo acontece con gran número de otros cuerpos, tales como aluminio, magnesio, platino, etc. Las oscilaciones son mucho menos vivas porque se imantan muy débilmente. Quedan también orientadas como enseña la

fig. 156 a. Estas substancias se llaman paramagnéticas.

Otras, en cambio, entre las cuales se pueden mencionar, zinc, plata, cobre, etc., y muy particularmente, al

nar, zinc, plata, cobre, etc., y antimonio y al bismuto, se orientan en el campo magnético en la forma que enseña la fig. 157. Esa orientación es debida a que frente al polo norte del electroimán aparece en la barra un polo norte y frente al sur un polo sur, produciéndose enseguida, fuerzas de repulsión.

Cuerpos que tienen esa propiedad se llaman diamagnéticos.



Cuerpos diamagnéticos Fig. 157.

La experiencia enseña que el diamágnetismo es casi siempre independiente de la temperatura.

14. Acción del calor. Temperatura de Curie. — Mientras que, como lo hemos dicho en el número anterior, el diamagnetismo es casi siempre independiente de la temperatura, en los cuerpos para y ferromagnéticos, la imantación que son susceptibles de adquirir bajo la acción de

un campo magnético es tanto menor cuanto mayor es la temperatura.

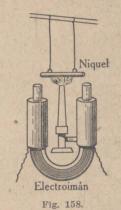
Si se calienta un imán hasta el rojo vivo y se le deja enfriar luego, se advierte que su imantación ha desaparecido por completo.

Un trozo de hierro mantenido al rojo vivo no es atraído por un imán; las fuerzas de atracción se hacen notorias,

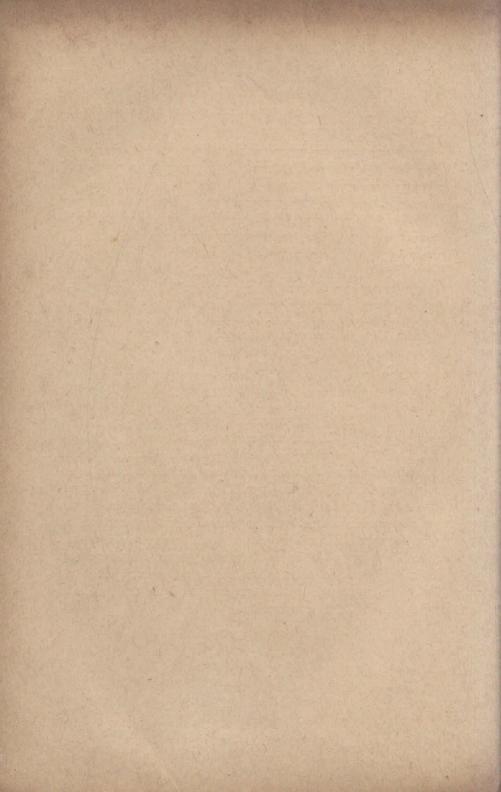
nuevamente, si se le deja enfriar, tan pronto como la temperatura baja de cierto valor.

Esa temperatura crítica, en la cual las propiedades magnéticas se hacen sumamente débiles, se llama temperatura de Curie. En el hierro esta temperatura está próxima a 770° C; en el níquel cerca de los 380° C.

Como experiencia de curso es recomendable la que representa esquemáticamente la fig. 158. Una barra de níquel está suspendida bifilarmente en la proxi-



midad de los polos de un electroimán. Si se excita a éste la barra de níquel es intensamente solicitada por las fuerzas magnéticas, lo que se manifiesta en los rápidos movimientos oscilatorios que ejecuta. Si se calienta al níquel con un mechero de Bunsen, cuando la temperatura se acerca al rojo, se comienza a notar que la acción del campo sobre él es más débil; la barra empieza a oscilar con lentitud; y cuando el rojo se hace vivo, se advierte que el sistema se mueve, exclusivamente, bajo la acción de la cupla propia de la suspensión.



CAPITULO X

ELECTROSTÁTICA

A. HECHOS FUNDAMENTALES

1. Electrización por frotamiento. — Existen motivos para admitir que ya 600 años antes de Jesucristo conocían los griegos el hecho de que el ámbar frotado adquiría la propiedad de atraer pedacitos de cuerpos livianos. Durante más de veinte siglos ese fenómeno no despertó la curiosidad científica del hombre, pues recién en el 1600 de nuestra era el físico inglés Gilbert investigó ese fenómeno comprobando que otras substancias como el vidrio, azu-

fre, etc., frotados con lana, piel u otros cuerpos se comportaban de idéntica manera que aquél (fig. 159).

Se dice de un cuerpo que adquiera esa propiedad que está *electrizado*, llamándose *electricidad* la causa que la pro-



Fig. 159.

duce. En el año 1729 Stephan Gray hizo notorio, con un experimento que realizó en la *Sociedad Real* de Londres, que todos los cuerpos se electrizan por frotamiento y que mientras en unos el estado eléctrico que da localizado en

el lugar frotado, como en el ámbar y en el azufre, p. ejem., en otros se propaga a los lugares vecinos o muy rápidamente, como en los metales, o con relativa lentitud como en las maderas secas. Según las experiencias de Gray se pueden ya dividir las substancias en aisladoras, conducto-

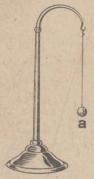


Fig. 160.

ras y semiconductoras. Sobre el contenido de estas denominaciones hemos de volver en más de una ocasión.

Entre los aisladores figura la goma laca, el ámbar, azufre, parafina, seda, lana, porcelana, papel seco, cautschou, etc. Conductores son: los metales, carbón de leña, grafito, ácidos, soluciones de sales y de ácidos, etc. De los semiconductores, mencionaremos el alcohol, éter, madera seca, etc.

Aprovechando las calidades de las substancias descubiertas por Gray, se construye

un aparato que permite poner de manifiesto el estado eléctrico de los cuerpos, suspendiendo un cuerpo liviano, una bolita de saúco, por ejemplo, de un hilo aislador, por lo común, de seda. Un aparato semejante (fig. 160), se llama péndulo eléctrico.

Si se acerca a un péndulo eléctrico (fig. 161 y 161 a),



Fig. 161.



Fig. 161 a.

una barra de ebonita, de vidrio o de metal con mango aislador, etc., p. ejem., frotada la bolita de saúco es atraída. Si toca la barra es repelida en seguida.

2. Las dos electricidades. Acciones reciprocas. - Entre los años 1733 y 1737, Du Fay, miembro de la Academia de París, descubrió la existencia de dos clases de electricidad que denominó vítrea y resinosa. Hoy se denominan positiva y negativa, respectivamente. La existencia de esas dos clases de electricidad se comprueba de la manera siguiente: tomemos dos barras: una de ebonita y otra de vidrio, y frotándolas con un paño de lana, p. ejem., probemos sus acciones sobre nuestro péndulo eléctrico. A fin de que las experiencias sean libres de objeción y más sugestivas usemos dos péndulos. Frotemos las barras y acerquemos a cada péndulo una de ellas. Se observan idénticos fenómenos: los péndulos son atraídos por las barras y luego rechazados bruscamente. Después del contacto existe, pues, una fuerza repulsiva, la que se hace notoria toda vez que se acerca a un péndulo la barra correspondiente. Si a uno de los péndulos se acerca, en cambio, la barra correspondiente al otro se advierte la existencia de una fuerza de atracción. Además, si se acercan entre si los péndulos eléctricos lo suficiente, se atraen, mientras que si ambos han sido tocados por una misma barra se repelen.

Resulta así que es forzoso admitir dos estados eléctricos diferentes, uno correspondiente al vidrio y el otro a la ebonita.

Haciendo la experiencia con cualquier otro cuerpo frotado, se obtiene siempre una de esas dos electrizaciones. Se dice, por esto, que existen dos clases de electricidad: la vítrea y resinosa o, lo que es igual, positiva y negativa.

De los experimentos que terminamos de mencionar, se deduce que electricidades del mismo nombre se repelen, mientras que las de diferentes nombres se atraen.

3. El electroscopio. — Por la existencia de una fuerza repulsiva entre cargas del mismo nombre, es posible cons-

truir un instrumento muy sensible y cómodo para el estudio de los fenómenos eléctricos. Ese aparato (fig. 162), está constituído por una varilla que termina en un extremo en una esfera y que lleva suspendida en el otro dos



hojuelas metálicas muy delgadas, de papel de estaño por ejemplo; la caja que le sirve de soporte es metálica con dos caras movibles de vidrio y el tapón T de ebonita bien pulida o lo que es mejor de ámbar. Tocando la esferita con un cuerpo frotado, toda la parte metálica se electriza y las hojuelas se repelen, puesto que tienen electricidad del mismo nombre. La magnitud del án-

gulo que forman da la medida del grado de electrización. El primer electroscopio lo construyó el inglés Gilbert, a quien hemos mencionado más arriba.

4. Conductores y aisladores. — Ya dijimos en el número 1 que en algunos cuerpos el estado eléctrico queda loca-

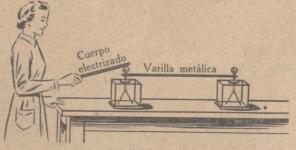


Fig. 163.

lizado en el lugar frotado, como en el ámbar y en el azufre, p. ejem., mientras que en otros se propaga a los

lugares vecinos o muy rápidamente, como en los metales, o con relativa lentitud como en las maderas secas. De acuerdo con eso, las substancias se dividen en aisladoras, conductoras y semiconductoras.

Las propiedades que acabamos de mencionar pueden ponerse fácilmente de manifiesto con el electroscopio-



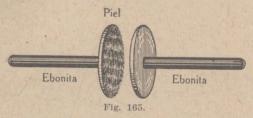
Fig. 164.

Si se unen dos electroscopios (fig. 163), con una varilla metálica y tocamos uno de ellos con un cuerpo electrizado las hojuelas de ambos divergen al mismo tiempo, en ángulos iguales si son idénticos. Unidos en cambio por una varilla de vidrio y ebonita, etc., bien seca (fig. 164), la electrización no se propaga al otro. Uniéndolos por una regla de madera bien seca, el segundo electroscopio dará manifestaciones de electrización poco a poco y no instantáneamente como en el caso de los metales.

5. Equivalencia de las dos cantidades de electricidad producidas por roce. — Al frotar un cuerpo cualquiera con otro, los dos cuerpos son en realidad frotados; y, por lo tanto, cabe esperar que ambos resulten electrizados.

Para averiguarlo, tomemos dos discos de ebonita, por ejemplo, con mango del mismo material; uno de ellos recubierto de piel (fig. 165). Frotándolos entre sí y separándolos luego, se comprueba, mediante un péndulo eléc-

trico, que ambos discos han sido electrizados y que las electricidades son de signo contrario. Si, en cambio, se acercan superpuestos al péndulo, no se manifiesta ninguna acción eléctrica. Los mismos resultados se obtienen usando



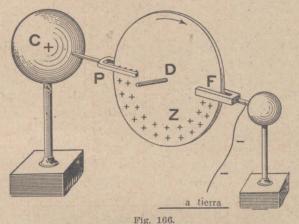
un aparato tan sensible como el electroscopio. Por frotamiento se producen siempre, entonces, los dos estados eléctricos y en el mismo

grado. O diremos, siguiendo el camino que instintivamente hemos tomado, que las cantidades de electricidad producidas por roce son equivalentes, o que masas de electricidad de signo contrario, que neutralizan sus efectos, son iguales.

6. Sobre la naturaleza de la electricidad. — Hemos llegado insensiblemente a hablar de cantidades de electricidad. Es una cualidad del espíritu humano no poder concebir la existencia de un fenómeno sin unirlo a la existencia de algo material. Los fenómenos eléctricos nos hacen pensar en seguida en una substancia que escapa a nuestros sentidos, y, en particular, la propagación del estado eléctrico en un conductor, de que su constitución ha de ser la de un flúido. A fin de tener una imagen clara de los fenómenos que hemos estudiado y de otros que ocuparán nuestra atención, se ha supuesto que en todo cuerpo existen dos flúidos: la electricidad negativa y la positiva en cantidades iguales y mezcladas perfectamente. Al frotar dos cuerpos, aparecerían en la superficie fuerzas que harían pasar a uno de ellos parte de uno de los flúidos del otro, y a éste una cantidad equivalente de flúido contrario, perteneciente al primero. Al separarlos, uno quedaría con un exceso de electricidad de un signo y el otro con un exceso equivalente de electricidad de signo opuesto.

La magnitud de la resistencia que opone un cuerpo al movimiento del flúido eléctrico le daría el carácter de conductor, semiconductor o aislador. En los conductores la electricidad se movería libremente, no existiendo una posición de equilibrio para cada elemento individual del flúido.

7. Máquina electrostática a frotamiento. — Esta máquina consiste (fig. 166), en un disco *D* de vidrio, dos almohadillas *F* de cuero recubierto de una aleación de mercurio, zinc y estaño, que por la acción de resortes de acero se



adhieren sobre aquél y de un conductor C que se prolonga en un brazo P dotado de puntas — por lo que se le llama peine — que terminan muy cerca de la superficie del disco. Si se hace girar a éste, el roce sobre las almohadillas origina en el vidrio electricidad positiva y en ellas electricidad negativa. La amalgama aumenta la producción de flúido.

Al llegar frente al peine, las cargas del vidrio originan en él, por influencia, cargas positivas y negativas. Estas últimas se escapan por las puntas y neutralizan las cargas de signo opuesto del disco. Las positivas cargan al conductor *C*. La electricidad negativa que se engendra en las almohadillas debe eliminarse de allí pues, de lo contrario, la producción de electricidad por roce cesaría. Por esa razón se las pone en contacto con tierra.

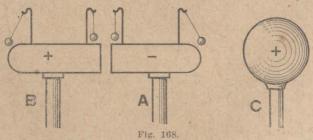
8. Influencia eléctrica. — Un conductor puede ser electrizado acercándole un cuerpo cualquiera cargado sin ser



tocado por éste. La electrización así obtenida, que fué descubierta por Gray, se llama electrización por influencia. Se habla en este caso de cuerpo inductor, de cuerpo y electricidad inducida.

Al acercar a un electroscopio un cuerpo cargado (fig. 167), se observa que la divergencia de

sus hojuelas aumenta a medida que la distancia entre ambos disminuye y que se cierran más y más si lo alejamos luego. Si dos conductores A y B, provistos de péndulos



(fig. 168) están en contacto en las cercanías de un cuerpo C electrizado positivamente, se observa que los péndulos eléctricos de los extremos divergen mientras que los de



Fig. 169.

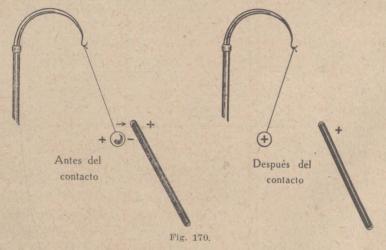
la región media quedan verticales. Existe, según esto, una zona neutra. Separando los conductores A y B siempre en presencia de C, se comprueba que los dos cuerpos están cargados en toda su extensión, pues todos los péndulos divergen: el cuerpo B positiva y el A negativamente. Después de la separación puede alejarse a C.

Según la teoría de los flúidos, la electricidad positiva de *C* rechazaría el flúido del mismo nombre a la región más alejada del conductor, es decir, a *B* y atraería al flúido de signo contrario hacia *A*.

Si una vez separados A y B y alejado C, los unimos nuevamente, todos los péndulos caerán completamente, lo que demuestra que las cantidades de electricidad de nombre contrario, producidas por influencia, eran iguales. Así se comprende porqué las hojas del electroscopio se cierran nuevamente cuando alejamos el cuerpo inductor.

Si extendemos el cuerpo inducido más y más, poniéndolo en comunicación con un cuerpo muy grande, la tierra, por ejemplo, quedan en el conductor sólo cargas de signo contrario a la del cuerpo inductor, pues las cargas del mismo signo, debido a la acción repulsiva, se distribuyen en toda la extensión del inmenso conductor. Aprovechando de esto podemos cargar fácilmente un cuerpo, un electroscopio, por ejemplo, por influencia. Basta acercarle un cuerpo cargado, tocarlo con la mano y alejar la carga inductora (fig. 169).

La atracción y repulsión eléctricas se explican fácilmente por el fenómeno de la influencia. Si se acerca un cuerpo cargado positivamente a otro, a un péndulo eléc-



trico, p. ejem., se producen en éste (fig. 170), por influencia, cantidades iguales de electricidades positiva y negativa. La fuerza de atracción sobre esta última es mayor que la repulsión sobre la otra, por estar más cerca. Si toca al euerpo cargado, sus cargas negativas son neutralizadas y quedan sólo cargas positivas que son rechazadas por la electricidad del mismo nombre del cuerpo cargado.

9. Distribución de la electricidad en la superficie de los conductores. — En los cuerpos conductores la electricidad en reposo se distribuye en la superficie exterior. Este

hecho puede comprobarse por medio del siguiente experimento. Una esfera metálica aislada (fig. 171), puede electrizarse haciendo contacto en su interior, a través de un orificio circular de que está dotada, mediante una esferilla provista de un mango aislador (esferilla de prueba), que se carga previamente. La experiencia enseña que ésta, después del contacto, queda descargada y que por más veces que se repita la operación sucede lo mismo.

Análogamente, si se carga directamente la esfera con una barra de ebonita frotada, p. ejem., se comprueba que si se toca en su interior,



Fig. 171.

a través del agujero, con la esferilla del experimento anterior, ésta sale sin carga alguna, pues acercándola a un

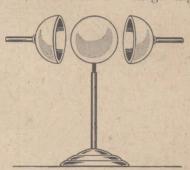


Fig. 172.

electroscopio las hojuelas de éste no se separan. Si se toca en el exterior, la esferilla se electriza.

Si a una esfera cargada (fig. 172), se le aplican dos hemisferios metálicos aislados, la electricidad pasa totalmente a éstos, pues la esfera queda completamente en estado neutro.

Si se curva una tela metálica cargada (fig. 173), que lleva suspendidas de ambos lados tirillas de papel que hacen el papel de electroscopios, éstas divergen sólo en los lugares en que aquélla es convexa. Los hechos que preceden se explican teniendo presente que por la acción repulsiva que se ejerce entre las cargas, éstas se desplazan

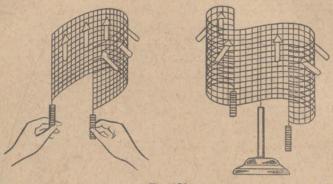


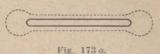
Fig. 173.

sobre el conductor de modo de quedar sobre él lo más lejos entre sí posible.

10. Densidad eléctrica. — La electricidad no se distribuye, en general, uniformemente en la superficie de los conductores. La experiencia enseña que se acumula más en los lugares donde la curvatura de la superficie es mayor, Es decir, que la densidad eléctrica varía, en general, de un lugar a otro. Se llama densidad eléctrica a la carga eléctrica contenida en una unidad de superficie, en un centímetro cuadrado, p. ejem.

La distribución de la electricidad en un cuerpo cualquiera cargado puede estudiarse experimentalmente usando un plano de prueba y un electroscopio. Aquél consiste en una pequeña superficie metálica flexible fija al extremo de una barra aisladora. Se superpone la pequeña superficie del plano de prueba a la región del conductor que se desea investigar y retirándolo en dirección de la normal a la superficie del conductor se lleva a contacto con el electroscopio, el que da por la divergencia de las hojas, una medida de la densidad eléctrica.

Gráficamente se representa la distribución de la electricidad sobre un conductor levantando en



cada punto del mismo una ordenada proporcional a la densidad eléctrica y construyendo la superficie que pasa



Fig. 173 b.

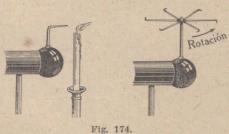
mismas. En las figs. 173 a y 173 b, se ve la distribución correspondiente a un disco y a un elipsoide.

Muy interesante es operar con el doble cono de la fig. 173 c. En la punta a la densidad es máxima, dentro de la concavidad e es, en cambio, muy pequeña.

11. Acción de las puntas. — De acuerdo con lo que se ha



Fig. 173 c.



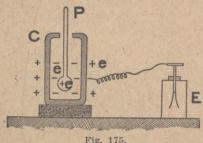
cia, la fuerza eléctrica tiene allí una gran intensidad. El aire que está en contacto con ella se electriza y al ser

dicho en el párrafo anterior, la electricidad se acumula más en los lugares de menor curvatura. Por eso en las puntas la densidad eléctrica es muy grande y, como consecuen-

rechazado produce el llamado viento eléctrico capaz de apagar una vela (fig. 174).

Debido a la reacción, es que una rueda (fig. 174), provista de puntas dobladas todas en el mismo sentido, conectada a una máquina eléctrica, gira en sentido opuesto al del viento eléctrico.

12. Relación entre las cargas inductoras e inducidas. — Se ha visto anteriormente, que por influencia se originan cantidades equivalentes de electricidad de los dos signos y se trata ahora de determinar la relación cuantitativa



entre estas cargas y las cargas que las producen. A Faraday (1791-1867) se debe el estudio experimental de esta cuestión, quien ha demostrado que si el cuerpo inducido envuelve completamente al inductor las cargas pro-

ducidas por influencia son iguales a la carga inductora. Esto se puede comprobar fácilmente introduciendo dentro de un cilindro metálico C (fig. 175), que esté en conexión con un electroscopio, una esfera de prueba cargada. Si ésta toca el cilindro, toda la electricidad se distribuye en la superficie exterior de éste y el electroscopio da cierta indicación. Descargando el cilindro e introduciendo nuevamente una carga igual a la anterior, pero sin tocarlo, se observa que el electroscopio diverge en el mismo ángulo que antes, lo que significa que la carga positiva que se distribuye en el exterior es igual a la carga positiva inductora.

En forma más convincente y significativa, puede comprobarse este hecho como sigue: Se introduce la esfera de prueba cargada sin tocar al conductor y se conecta éste momentáneamente a tierra. Se observa que el electroscopio no diverge. Si se retira la carga inductora, el electroscopio acusa la presencia de cargas e introduciendo nuevamente aquélla v tocando el conductor cilíndrico se verá que queda en estado neutro. Al conectar a tierra el cilindro la carga del mismo signo que la inductora se va a ella y queda por atracción la del signo contrario del lado interior del vaso. Retirando la pequeña esfera, la electricidad se distribuye en la parte exterior del cilindro y por fin, al tocarlo con aquélla, las cargas se neutralizan, lo que significa que la cantidad de electricidad producida por influencia es igual y de signo contrario que la inductora.

13. Caja de Faraday. - Vimos que la electricidad en reposo se distribuye en la superficie exterior de los con-

ductores. La experiencia enseña algo más: que dentro de los mismos la fuerza eléctrica es nula. Esto se puede comprobar mediante la instalación de la figura 176. Por más que se cargue la caja metálica, el electroscopio interior no da la más mínima señal de electrización. Esa



caja metálica que protege, en realidad, todo lo que está en su interior de la acción de masas eléctricas constituye una Caja de Faraday.

El sistema de pararrayos Melsens se funda en ese mismo principio. El edificio que se quiere proteger (fig. 177),

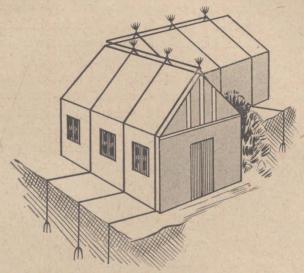
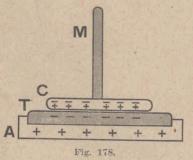


Fig. 177.

se envuelve, por así decir, en una red de conductores cuyos extremos se adentran en el suelo.

14. El electróforo de Volta. — El electróforo de Volta consiste (fig. 178), en una torta I de parafina o ebonita



montada sobre una armadura metálica A y de un conductor C, en forma de disco, que lleva un mango aislador M.

Si se frota la ebonita o parafina con una piel de zorro, p. ejem., se producen en ella cargas eléctricas negativas.

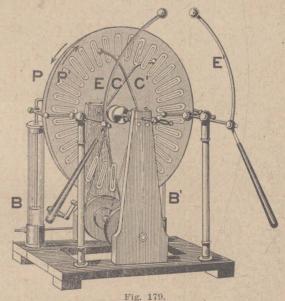
Si se acerca C a la torta aparecen en él cargas posi-

tivas y negativas, en cantidades tanto mayores cuanto más

se le aproxima. Si se conecta *C* momentáneamente con tierra, tocándolo con la mano, p. ejem., sólo quedan en él las cargas positivas, las cuales pueden transportarse a otro conductor. Las operaciones descriptas pueden repetirse muchas veces antes que desaparezca la electrización del aislador.

15. La máquina de Wimshurst. — Aun cuando el principio de la influencia había sido empleado anteriormente por el italiano Belli en el año 1831, las máquinas a influencia, en su forma práctica, fueron construídas por Augusto Töpler y por Guillermo Holtz en el mismo año (1865).

En esas construcciones se funda la máquina Wimshurst, que fué descripta por éste en el año 1883, v que está representada en la fig. 179. Consiste en dos discos de vidrio, recubiertos con una capa de goma laca, montados paralelamente sobre un mismo eje, de



tal modo que pueden hacerse girar en sentidos opuestos con igual velocidad. Los discos llevan sobre sus lados exteriores pequeños sectores metálicos dispuestos radialmente y equidistantes entre sí. Sobre los diámetros horizontales se encuentran dos pares de peines p y p', mon-

tados en soportes aisladores, que se prolongan mediante piezas articuladas, en dos varillas metálicas, curvadas, E y E', que terminan en dos pequeñas esferas. Estas piezas constituyen el sistema colector y de descarga.

Los peines están conectados con dos pequeñas botellas de Leyden, cuyas armaduras exteriores se comunican metálicamente, pero de tal manera que la conexión puede interrumpirse a voluntad girando una varilla. Inclinadas a 45°, más o menos — la mejor posición debe determinarse experimentalmente — sostenidas por el eje de los discos,

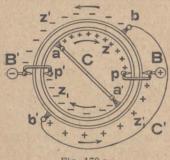


Fig. 179 a.

se encuentran dos varillas metálicas C y C que terminan en un haz de cintillas conductoras o pincel que se mantienen en permanente contacto con las placas. Su papel se reduce a neutralizar ciertas cargas, según se verá en seguida. Para explicar su funcionamiento representaremos los discos (fig. 179 a), por dos cilindros concéntricos de vi-

drio que giran en sentidos opuestos. Si suponemos que en la región Z del disco interior se encuentran cargas positivas, éstas descompondrán, por influencia, el estado del conductor C. La electricidad negativa, que es atraída por aquella carga, pasa, a través del pincel b, a la región Z' del cilindro exterior y la positiva a través de b' a la zona Z'₁. Las cargas positivas del cilindro interior, a medida que por la giración del mismo pasan frente al peine p, dan lugar a que éste y el conductor B, por el proceso conocido, se carguen de electricidad del mismo signo. De manera análoga el conductor B' se carga de electricidad negativa.

Por otra parte las cargas de las regiones Z' y Z'_1 producen, por influencia, cargas positivas y negativas en el conductor C, de las cuales, las primeras fluyen a través

del pincel a, atraídas por las negativas de Z, aumentando las cargas del mismo nombre que tiene el cilindro interior en la zona Z; las segundas van, a través de a, a reforzar las cargas negativas que se encuentran en la región Z_1 . Aumentan, por lo tanto, así las cargas que, por influencia, originan la electricidad de B y B. Éstas se multiplican con aquel incremento.

Es, pues notorio, que es suficiente la aparición de una carga pequeñísima en cualquier parte de los discos para que se inicie el proceso con su consiguiente multiplicación. Durante la rotación, por el contacto y roce de los pinceles con los sectores metálicos, aparecen aquellas cargas iniciales indispensables para el funcionamiento de la máquina. La cantidad de electricidad que se produce en cada vuelta es proporcional a la superficie, es decir que ella crece con el cuadrado del radio. Como prácticamente éste no puede pasar de ciertos límites, para aumentar la producción de electricidad, es menester montar varias máquinas sobre un mismo eje de modo que carguen los mismos conductores. Se tiene así una máquina a múltiples pares de discos.

Wommelsdorf ha construído una máquina cómoda, que produce grandes cargas y potenciales. Uno de sus modelos da una corriente ininterrumpida de chispas de 35 ctms. de largo en el aire.

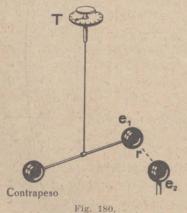
ADVERTENCIA IMPORTANTE. — A veces ocurre que las máquinas electrostáticas funcionan mal no obstante estar los conductores C y C y los peines en las posiciones correctas. En ese caso es indispensable frotar los discos repetidas veces, sea éste de vidrio engomalacado o de ebonita, con un paño bien limpio mojado en agua destilada y lo mismo el vidrio de los condensadores y soportes aisladores. Hecha esa operación debe secarse la máquina, lo que se logra calentándola moderadamente en el interior de una caja cerrada dotada de un calentador eléctrico.

B. LA LEY DE COULOMB, EL CAMPO ELÉCTRICO, EL POTENCIAL

16. La ley de Coulomb. Unidad electrostática CGS. Unidad práctica: Coulomb. — Coulomb comprobó experimentalmente que dos cargas eléctricas se atraen o se repelen con una fuerza que es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Es decir, que si e1 y e2 son las cantidades de electricidad y r la distancia entre ellas, (fig. 180), la fuerza F está dada por la expresión

$$F=\pm rac{e_1\,e_2}{r^2}\,,$$

donde el signo positivo corresponde a la repulsión y el negativo a la atracción, ya que masas del mismo signo se



repelen v masas de signo opuesto se atraen.

Coulomb hizo sus medidas con una balanza de torción de la cual la fig. 180 es una representación esquemática.

Si las dos cargas eléctricas son iguales, es decin si $e_1 =$ $e_2 = e$, se tiene por la lev anterior.

$$e = r \sqrt{F}$$

expresión que permite definir la unidad de carga o ma-

sa eléctrica, pues si r = 1 = cm y F = 1 dina, es e = 1.

Una carga eléctrica es, pues, la unidad si repele a otra carga igual situada a un centímetro de distancia con la fuerza de una dina. Esta unidad de carga eléctrica es la unidad electrostática absoluta CGS.

Como esa unidad es muy pequeña, en la técnica y, por lo tanto, en la práctica se usa como unidad de cantidad de electricidad una carga tres mil millones de veces mayor. Esta unidad práctica o técnica recibe el nombre de Coulomb. Es, pues,

1 Coulomb = 3×10^9 unidades electrostáticas absolutas.

17. Campo eléctrico. Su intensidad. — El espacio que rodea a las cargas de electricidad, dentro del cual se manifiestan fuerzas eléctricas, se denomina campo eléctrico.

Veamos, p. ejem., cuál es la fuerza que obra sobre una carga e' situada en un punto P del espacio que rodea a dos cargas iguales y de signos opuestos situadas en los puntos A y B (fig. 181). La carga

+e le aplica la fuerza

$$F_1 = \frac{ee'}{r_1^2}$$

en la dirección de r_1 y la carga — e la

$$F_2=rac{ee'}{{r_2}^2}$$

Esta línea como paralela a las líneas

Fig. 181.

en la dirección de r_2 . La resultante F de las fuerzas F_1 y F_2 representa la fuerza que aplica el campo de las cargas +e y -e en el punto P a la carga +e' situada en él. Si esta carga e' fuese la unidad, F sería la intensidad del campo eléctrico en cuestión en el punto P.

En general, la intensidad de un campo eléctrico en un punto P está dada en magnitud, dirección y sentido por la fuerza que obra sobre la unidad de carga eléctrica positiva supuesta en el punto.

18. Líneas de fuerza. — Si en un punto cualquiera A (fig. 182), de un campo eléctrico se abandona a sí misma una carga pequeña, comenzará a moverse en la dirección de la fuerza del campo allí reinante. Si se la detiene en un punto B, muy próximo a A, y se la abandona nueva-

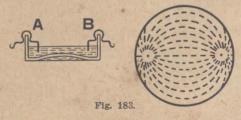


mente, reiniciará su movimiento en la dirección de la fuerza del campo en B. Por detenciones sucesivas, en puntos muy próximos unos a otros, se logra, pues, que la carga

se mueva en todo momento en la dirección de la intensidad del campo eléctrico. Si los puntos de detención se hacen más y más cercanos, la línea quebrada que describe la carga se aproxima indefinidamente a una línea continua que goza de la propiedad de que la intensidad del campo eléctrico en uno cualquiera de sus puntos está dada en dirección por su tangente en el mismo punto. Una línea tal se denomina línea de fuerza. Está claro que proviniendo la fuerza eléctrica de las cargas, las líneas de fuerza salen de éstas o llegan a ellas.

Por medio de las líneas de fuerza se representa objetivamente la distribución de las fuerzas en todo el campo

eléctrico. Como experimento de curso es aconsejable el siguiente: En un cristalizador (fig. 183), se mezclan esencia de trementina y sulfato de



quinina y se unen los dos conductores metálicos A y B, que terminan en dos pequeñas esferitas, con los polos de una máquina eléctrica. Iluminando de abajo hacia arriba, se verá, por proyección, que los cristalitos de sulfato se ordenan en la forma que enseña la fig. 183.

Podemos decir de acuerdo con lo que precede que las líneas de fuerza nacen en las cargas positivas y terminan en las cargas negativas. Las líneas de fuerza del campo eléctrico tienen, pues, principio y fin, no son cerradas como las del campo magnético.

19. El potencial. — I. Idea experimental. — En el número 9 de este capítulo vimos que en el doble cono de la fig. 173 la densidad de la electricidad varía de una

manera notable de un lugar a otro. Eso no obstante, si desplazamos sobre él el extremo de un conductor que está unido a un electroscopio (fig. 184), se obser-

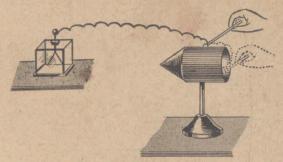


Fig. 184.

va que la divergencia de las hojuelas de éste permanece constante, es decir, que no depende del punto del conductor en que se haga contacto. Este hecho patentiza la existencia de una magnitud física que tiene el mismo valor en todos los puntos del conductor, y que está medida por la abertura de las hojuelas del electroscopio.

Esa magnitud física, suerte de nivel eléctrico, se llama el potencial.

De dos conductores diferentes cargados que se conectan sucesivamente con el mismo electroscopio (¹) está a mayor potencial el que produce mayor divergencia en las hojuelas de éste. Un cuerpo tiene el potencial *cero* si no pro-

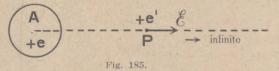
⁽¹⁾ Suponemos que su capacidad es muy pequeña respecto a la de los conductores.

duce separación alguna de las hojuelas de un electroscopio. En ese caso está, p. ejem., la tierra.

Los fenómenos electrostáticos dependen, pues, de dos magnitudes que son: la cantidad de electricidad y el potencial, así como los fenómenos del calor dependen de la cantidad del calor y de la temperatura.

Ya veremos que si se ponen en contacto dos cuerpos a diferentes niveles eléctricos, es decir, a potenciales diferentes, pasa electricidad del cuerpo de mayor al de menor potencial, análogamente a lo que sucede si se ponen en contacto dos cuerpos a temperaturas desiguales, en cuyo caso pasa calor del de mayor al de menor temperatura.

II. Definición precisa del potencial. — Supongamos que se tiene un conductor A (fig. 185) cargado con la cantidad de electricidad +e. Una carga +e'=1 situada



en un punto P de su campo eléctrico será rechazada con cierta fuerza \mathcal{E} que

es la intensidad del campo eléctrico del conductor cargado en P, ya que la intensidad de un campo en un punto es la fuerza que obra sobre la unidad positiva de carga supuesta en el punto. Está claro que esa fuerza $\mathcal E$ varía con la distancia de P al cuerpo. Si la carga e' puede moverse libremente bajo la acción de la fuerza $\mathcal E$ se alejará indefinidamente del conductor, hasta el infinito. Puesto que el punto de aplicación de la fuerza $\mathcal E$ se desplaza, se pone en juego trabajo. De acuerdo con el principio de conservación de la energía ese trabajo que se gasta por el pasaje de la carga +e' desde el punto P hasta el infinito, es un trabajo que estaba almacenado en el sistema por el hecho de estar la carga +e' en el punto P del campo eléctrico del conductor A, de la misma manera

que un cuerpo por el solo hecho de encontrarse a cierta distancia de la tierra posee energía potencial. Está claro que ese trabajo es el que es menester gastar para transportar la carga +e, en contra de la fuerza $\mathcal E$ del campo, desde el infinito hasta el punto P.

Se llama potencial de la carga del cuerpo A en el punto P al trabajo que es menester gastar para transportar la unidad de carga desde el infinito hasta el mismo punto.

Cuando P es un punto del conductor se tiene el potencial de éste.

$$\begin{array}{c}
A \\
+ e
\end{array}

\begin{array}{c}
V_2 \\
P_2
\end{array}
+ e^{iV_1} \xrightarrow{g} ----$$
Fig. 186.

De acuerdo con eso si V_1 y V_2 son los potenciales en los puntos P_1 y P_2 (fig. 186), si se transporta la carga +e' desde el punto P_1 hasta el P_2 se gasta el trabajo

$$A = (V_2 - V_1)e'. [1]$$

Si es e' = 1, se tiene

$$A = V_2 - V_1, \qquad [2]$$

es decir, que la diferencia de potencial $V_2 - V_1$ entre dos puntos P_1 y P_2 de un campo eléctrico, es el trabajo que se pone en juego al transportar entre ellos la unidad de carga.

III. EL POTENCIAL DE UN CONDUCTOR CON CARGAS ELÉCTRICAS EN EQUILIBRIO TIENE EL MISMO VALOR EN TODA SU SUPERFICIE. — Esto lo hemos afirmado en el apartado I. Ahora se trata de demostrar que el potencial tal como lo hemos definido en el apartado anterior, tiene el mismo valor en todos los puntos de un conductor electrizado con cargas en equilibrio. Por lo dicho en el número anterior, la electricidad positiva se mueve bajo la acción de las fuerzas del campo de los lugares de mayor potencial a los de

menor potencial, mientras que la negativa lo haría en sentido opuesto.

De ese hecho resulta que si las cargas de un conductor, en el cual pueden moverse libremente, están en reposo, es porque no hay entre sus puntos ninguna diferencia de potencial.

20. Unidad electrostática y práctica de diferencia de potencial. — Hemos visto, en el número anterior, que el trabajo eléctrico está dado por la expresión

$$A = (V_2 - V_1)e', [3]$$

de donde resulta que la diferencia de potencial $V_2 - V_1$ es la unidad, que por el momento no especificamos, cuando es A = 1 y e' = 1.

Se dice que entre dos puntos existe la unidad electrostática de diferencia de potencial cuando para transportar la unidad electrostática de cantidad de electricidad del uno al otro se pone en juego el trabajo de un erg.

La unidad práctica o técnica de diferencia de potencial es el Volt. Entre dos puntos de un campo eléctrico existe una diferencia de potencial de un Volt cuando al transportar un Coulomb de electricidad de uno al otro se pone en juego un trabajo de un Joule.

Se demuestra sin dificultad que esta unidad es la trescientas ava parte de la anterior.

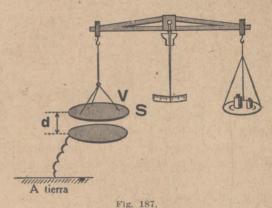
21. El potencial de la tierra. — Dimos ya una razón experimental que justifica la asignación a la tierra del potencial cero.

Como el trabajo eléctrico, que es lo que podemos medir, depende de la diferencia de potencial y no de los valores absolutos de éstos, se pueden expresar las diferencias de los potenciales de cuerpos A, B, C, etc., con la tierra atribuyendo a ésta el potencial cero, así como atribuimos al hielo en fusión la temperatura de cero grado. Esas diferencias dan potenciales de A, B, C, etc., tales que no alteran los valores de las diferencias de potencial existentes entre ellos.

22. Medida de una diferencia de potencial. Principio del electrómetro absoluto de Lord Kelvin. — Aun cuando el con-

cepto de potencial y, por lo tanto, de diferencia de potencial, parece abstracto su medición no ofrece dificultad.

Es fácil demostrar que dos placas de área S, que tienen los potenciales V y cero, respectivamente.



situadas una frente a la otra paralelamente (fig. 187), se atraen con una fuerza F dada por la expresión

$$F = \frac{V^2}{8\pi d^2} S \tag{4}$$

de donde

$$V = d \sqrt{\frac{8\pi F}{S}}$$
 [5]

El valor de F es el peso que es menester colocar en el platillo de la izquierda de la balanza de la instalación de la figura para que el fiel quede en cero, en cuyo caso la distancia entre los platillos es d. Conocido F, d y S se calcula V en seguida.

23. Ejercicios. — De un conductor que está al potencial de 220 Volt a otro cuyo potencial es de 110 Volt, han pasado 300 Coulomb de electricidad. ¿Cuál es el trabajo gastado?

Puesto que la diferencia de potencial entre los conductores es de 110 Volt, por el pasaje de un Coulomb de uno al otro se pone en juego un trabajo de 110 Joule y por lo tanto durante el transporte de los 300 Coulomb el trabajo que se gasta es

$$A = 110 \text{ Volt} \times 300 \text{ Coulomb} = 33000 \text{ Joule}$$

y puesto que

1 Joule =
$$\frac{1}{g}$$
 Kgm.,

donde g es la aceleración de la gravedad

$$A = \frac{33000}{9.80}$$
 Kgm. = 3367,3 Kgm.

2. Por el transporte de 50 Coulomb de electricidad entre dos conductores se han gastado 4000 Joule de trabajo. ¿Cuál era la diferencia de potencial de aquéllos?

Sabemos que es

A Joule =
$$e$$
 Coulomb $\times V$ Volts

de modo que

$$V \text{ Volts} = \frac{A \text{ Joule}}{e \text{ Coulomb}}.$$

La diferencia de potencial buscada es, pues,

$$V = \frac{4000 \text{ Joule}}{50 \text{ Coulomb}} = 80 \text{ Volt.}$$

3. ¿Cuál ha sido el valor de una carga eléctrica para cuyo transporte entre dos puntos que estaban a la diferencia de potencial de 100 Volt se gastaron 10000 Joule? De acuerdo con la relación del problema precedente, es

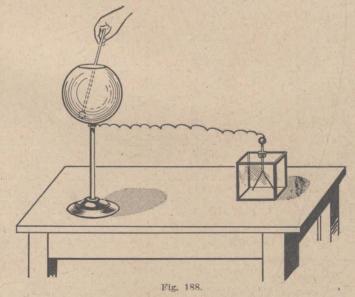
$$e = \frac{A \text{ Joule}}{V \text{ Volt}} = \frac{10000}{100} \text{ Coulomb}$$

es decir que

e = 100 Coulomb.

C. Capacidad. Condensadores. Energía de un conductor cargado

24. Capacidad de un conductor. — I. Definición. — Mediante la instalación de la fig. 188, puede comprobarse que



a medida que crece la carga de la esfera, su potencial aumenta, lo que se manifiesta en un incremento de la

separación de las hojuelas del electroscopio. La experiencia enseña que si la carga se duplica, triplica, etc., el potencial del conductor se hace doble, triple, etc., también. Éste es un hecho general que ocurre en todos los conductores. Es decir, que el cociente entre la carga y el potencial queda constante para un conductor dado, variando de uno a otro. Ese cociente constante se llama capacidad del conductor y se le indica con la letra C. Si e y V representan, como hasta aquí, la carga y el potencial, se tiene

$$C = \frac{e}{V}$$
 [6]

de donde

$$e = CV \quad [7], \qquad V = \frac{e}{C} \quad [8]$$

II. UNIDADES DE CAPACIDAD. — De la definición anterior resulta que

$$C = 1$$
 si $e = 1$ y $V = 1$,

expresiones que permiten definir las unidades de capacidad.

Se dice que un conductor tiene la unidad de capacidad en el sistema electrostático absoluto *CGS* cuando cargándolo con la unidad electrostática de cantidad de electricidad adquiere la unidad de potencial del mismo sistema.

En el sistema técnico o práctico un conductor tiene la unidad de capacidad, que se denomina Farad, cuando cargándolo con un Coulomb de electricidad su potencial adquiere el valor de un Volt.

Como el Farad es una unidad muy grande, se usa el microfarad (MF) que es la cienmilésima parte de un Farad, es decir que

1 Microfarad = 1MF = 10-5 Farad.

Por otra parte es fácil demostrar que 1 Farad es 9.10¹¹ veces mayor que la unidad de capacidad del sistema electrostático.

III. La capacidad de una esfera. — Las cargas que están sobre una superficie esférica completamente aislada, sola en el espacio, se distribuyen uniformemente en ella y se comportan como si estuvieran concentradas en su centro, siendo el potencial en un punto situado a la distancia r del centro de la esfera.

$$V = \frac{e}{r},$$
 [9]

si e es la carga total. El potencial de la esfera es, por lo tanto,

$$V = \frac{e}{R},$$
 [10]

si R es su radio.

La capacidad de una esfera está, pues, medida por su radio.

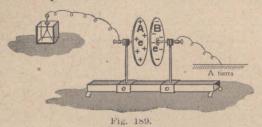
25. Variación de la capacidad de un conductor si se le acerca otro a potencial cero. Principio de los condensadores.

— La experiencia enseña que la capacidad de un conductor depende de su posición relativa con respecto a otros conductores. Si a un conductor cargado, a cierto potencial V, se le acerca otro a potencial cero, esto es conectado a tierra, su potencial disminuye. De esto se infiere que su capacidad aumenta en la misma proporción, puesto que es

$$e = CV$$

y la cantidad e de electricidad con que está cargado no varía.

Ese hecho se hace ostensible, fácilmente, mediante el dispositivo que enseña la fig. 189, denominado condensador plano. Está constituído por dos placas metálicas

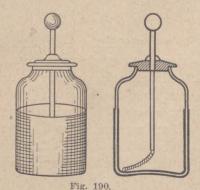


planas, situadas paralelamente una frente a la otra, aisladas y montadas de tal modo que la distancia que las separa puede va-

riarse fácilmente. Si se conecta una de ellas, la A, con un electroscopio y se la carga, las hojuelas de aquél divergen en cierto ángulo, que se hace tanto menor cuanto más se acerca la otra placa B mantenida a potencial cero. La disminución de la divergencia de las hojuelas del electroscopio, enseña que el potencial del conductor disminuye y como la carga no varía se sigue que la capacidad aumenta. Para que el conductor adquiera el potencial primitivo, será preciso, pues, suministrarle nuevas cargas, de donde proviene el nombre de condensador. Un conden-

sador permite, entonces, almacenar bajo un potencial relativamente reducido, cargas considerables.

Si la placa A tiene la carga +e, la otra placa B tendrá la -e, pues por inducción en ésta se producen dos cargas +e y -e, de las cuales la primera se va a tierra.



26. La botella de Leyden. —

La botella de Leyden (fig. 190), es un condensador muy cómodo. Fué inventada por el prelado von Kleist, de Karvin, Pomerania, el año 1745. Consiste en un vaso de vidrio recubierto exterior e interiormente, hasta cierta altura, con láminas de estaño. Esas partes metálicas se

denominan armaduras. Se carga conectando una armadura, la interior por razones de comodidad, con uno de los polos de una máquina eléctrica y la otra a tierra lo mismo que el otro polo de aquélla. Se descarga usando el aparato que representa la fig. 191 que se llama excitador, formado por dos varillas metálicas, acodadas, termina-



Fig. 191.

das en pequeñas esferas, provistas de un mango aislador. Para ello se toca con una de las ramas del excitador a la armadura interior, p. ejem., y se acerca la otra rama a la armadura exterior. Alcanzada cierta distancia que depende de la diferencia de potencial entre las armaduras, estalla una chispa cuyo tamaño y brillo da una medida de la cantidad de electricidad condensada.

Uniendo metálicamente todas las armaduras exteriores e interiores, respectivamente, se tiene una batería de condensadores cuya capacidad es la suma de las capacidades de cada uno de ellos. También pueden unirse la interior de uno con la exterior del siguiente. Si se unen así, n condensadores iguales resulta un sistema que tiene una capacidad que es la enésima parte de la de uno de ellos.

27. Ejercicios. — 1. Un conductor ha sido cargado con un Coulomb de electricidad, carga que ha elevado su potencial a 10.000 Volt. ¿Cuál es su capacidad?

Sabemos que es

$$C \text{ Farad} = \frac{e \text{ Coulomb}}{V \text{ Volt}}$$

y, por lo tanto, la capacidad del conductor es

$$C = \frac{1 \text{ Coulomb}}{10.000 \text{ Volt}} = 0,0001 \text{ Farad}$$

o, puesto que

1 Microfarad =
$$10^{-5}$$
 Farad $C = 10$ Microfarad.

2. Un condensador de 5 Microfarad (MF) ha sido conectado con los polos de la red común de alumbrado, entre los cuales la diferencia de potencial es de 220 Volt. ¿Qué cantidad de electricidad ha almacenado en sus armaduras?

Es
$$e$$
 Coulomb = C Farad V Volts

y puesto que

$$5 \text{ MF} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ F}$$

se tiene

$$e=5$$
 . 10^{-5} Farad \times 220 Volt = 0,011 Coulomb.

3. Un condensador de 0,1 MF ha sido cargado con 0,01 Coulomb de electricidad. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre sus armaduras?

Es, como ya sabemos,

$$V \text{ Volt} = \frac{e \text{ Coulomb}}{C \text{ Farad}}$$

$$0.1 \ MF = 0.1 \times 10^{-5} \ F = 10^{-6} \ F$$

y, por consiguiente,

y

$$V = \frac{0.01 \text{ Coulomb}}{10^{-6} \text{ Farad}} = 10.000 \text{ Volt.}$$

28. Energía de un conductor cargado y de un condensador.
-- I. Su expresión. — Si un conductor tiene la carga e y su potencial es V, la energía que ese estado eléctrico representa es

$$W = \frac{1}{2} e V$$
 [11]

Si e está dado en Coulomb y V en Volt, esa energía resulta expresada en Joule. Esta energía no está almacenada en el conductor, por más que e y V son magnitudes que a él se refieren, sino en el campo eléctrico.

II. PRUEBA. — Inicialmente, tanto la carga como el potencial son nulos. Podemos suponer que se le carga llevando por vez desde el infinito o desde la tierra, donde el potencial es cero, hasta él cargas muy pequeñas, iguales, p. ejem., a e:n, donde n es muy grande. Así tanto la carga como el potencial varían de una manera continua desde cero hasta e y V, respectivamente.

El trabajo que se gasta por el transporte de una de esas cargas es igual al producto de las mismas por el potencial que tiene el conductor en ese momento. Para las primeras cargas, el potencial es casi nulo y para las últimas, casi el valor final V. Es notorio, que el trabajo total gastado será el mismo que se gastaría transportando las n cargas iguales a e:n desde un lugar a potencial

nulo hasta otro donde el potencial fuera el término medio entre 0 y V, es decir, V:2. Ese trabajo, es:

$$W = n \cdot \frac{e}{n} \cdot \frac{V}{2} = \frac{1}{2} e V$$

como afirmamos.

III. Otras formas de expresión. — La [11] puede expresarse de otras dos maneras eliminando *e* y *V*, respectivamente, mediante la expresión [9] que define la capacidad. Resulta:

$$W = \frac{1}{2}CV^2$$
 [12] $y \quad W = \frac{1}{2}\frac{e^2}{C}$ [13]

IV. Energía de un condensador. — La energía de un condensador, está expresada, lo cual es evidente, por las fórmulas 11, 12 y 13, siendo e la carga de una cualquiera de sus armaduras, V la diferencia de potencial entre ellas y C la capacidad.

29. Dieléctricos. La constante dieléctrica. — A los cuerpos aisladores, se les da el nombre de dieléctricos. Si se intro-

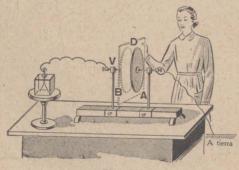


Fig. 192.

duce entre las placas A y B de un condensador plano (fig. 192), una de cuyas armaduras, a potencial V, está conectada con un electroscopio, una torta D de parafina o un disco de ebonita, vidrio, azufre, etc., se observa que la diver-

gencia de las hojuelas del electroscopio disminuye, lo que prueba que el potencial de la placa B decrece. Puesto que

su carga no aumenta ni disminuye con esa operación, es forzoso concluir, que su capacidad aumenta en la misma proporción que disminuye el potencial.

El cociente de dividir la capacidad de un condensador cuyas armaduras se encuentran en una substancia determinada por la capacidad del mismo condensador cuando la substancia es el aire (¹) es una constante de aquella substancia que se denomina constante dieléctrica o poder inductivo específico. La representaremos con la letra ɛ (épsilon).

Damos a continuación las constantes dieléctricas de diversos cuerpos.

Cuerpos	Constante dieléctrica 8
Vidrio	5,4 a 9,9
Ebonita	2,7 a 2,86
Parafina	2,15
Porcelana	5,7 a 6,8
Mármol	8
Mica	5,7 a 6,6
Cloroformo	5,2

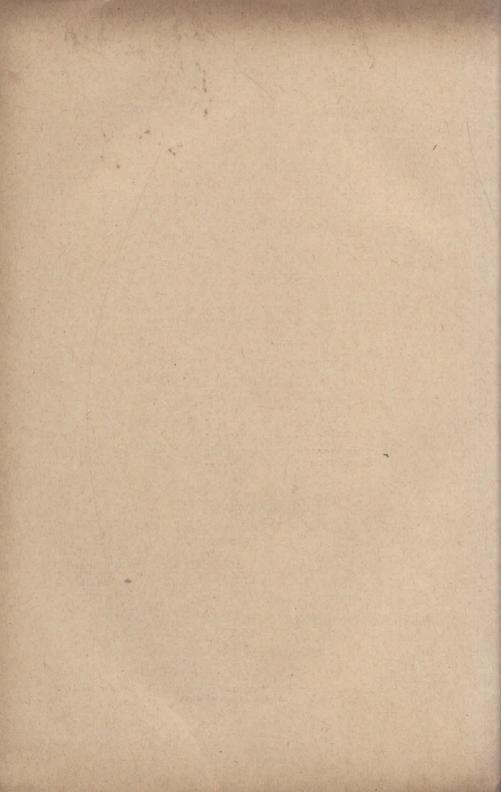
Puesto que la distancia entre las placas no se modifica y la diferencia de potencial entre ellas disminuye ε (épsilon) veces, se sigue que la fuerza eléctrica entre las armaduras ha disminuído también ε veces.

De acuerdo con lo que precede, la fuerza con que se atraen o se repelen dos cargas e, e', situadas en un medio de constante dieléctrica e, está dada por la expresión

$$F=\pm\,rac{1}{arepsilon}\,rac{ee'}{r^2}.$$

Se tiene así una generalización de la ley de Coulomb.

⁽¹⁾ Rigurosamente debíamos decir "cuando las armaduras están en el vacío". Prácticamente hay que referir, como lo hacemos, al aire.



CAPITULO XI

LA CORRIENTE ELÉCTRICA

A. Efectos de la corriente. La pila como fuente de electricidad

1. Unión de dos conductores cargados a distinto potencial.

— I. Los несноs. — Supongamos que se tienen dos conductores A y B aislados (fig. 193), a diferentes niveles eléctricos, a los potenciales V_1 y $V_2 < V_1$, p. ejem. El campo eléctrico del sistema que ellos constituyen se encuentra en el espacio que los circunda. Puesto que por la

definición de diferencia de potencial V_1 — V_2 es el trabajo que hay que gastar, esto es, entregar al sistema para transportar la unidad de carga desde B hasta A, está claro que durante ese transporte la carga antes citada es desplazada en sentido opuesto a la fuerza

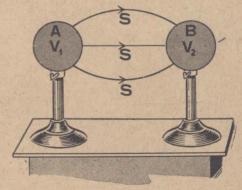


Fig. 193.

eléctrica. La fuerza eléctrica tiene, pues, como ya se ha dicho, el sentido que va de los potenciales mayores a los menores. Si la diferencia de potencial es nula, nula es la fuerza. En la fig. 193 las líneas S son líneas de fuerza.

Si esos conductores A y B se unen por un conductor

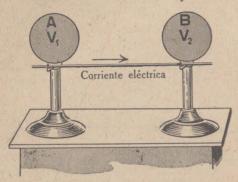


Fig. 194.

(fig. 194), la fuerza eléctrica que obrará ahora dentro de éste, hará desplazar la electricidad de A hacia B, con lo que el potencial de A disminuye y el de B aumenta. El pasaje de la electricidad durará hasta que el potencial tenga el mis-

mo valor en todas partes. Sucede en este caso lo análogo

que cuando se unen por un tubo dos vasos que tienen un líquido a diferentes niveles (figura 195). El flúido pasa del vaso donde el nivel

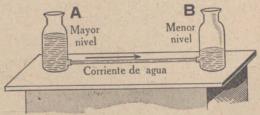


Fig. 196.

es mayor al vaso de menor nivel. El movimiento del líqui-

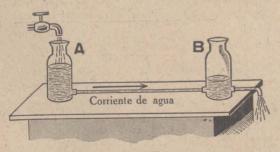


Fig. 195.

do cesa cuando su nivel es igual en ambos vasos.

En cambio, en la instalación de la fig. 196, puede mantenerse siempre una diferencia de nivel entre un va-

so y otro fluyendo el líquido constantemente por el tubo

del vaso A hacia el vaso B. Se tiene así una corriente de líquido que va del nivel mayor al nivel menor.

El análogo eléctrico de este caso hidrodinámico permite realizarlo la instalación de la fig. 197. La armadura interna de una botella de Leyden está unida a uno de los polos de una máquina electrostática, lo que permite mantener su potencial constante. Un hilo conductor (lo

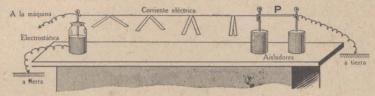


Fig. 197.

mejor es un piolín apenas humedecido con agua corriente) está tendido entre esa armadura y una varilla metálica montada en un aislador. Mediante un puente metálico P puede conectarse a tierra esa varilla y, por lo tanto, el extremo del piolín. A lo largo de éste se han situado, equidistantes, varias hojuelas dobladas de papel que se comportan como electroscopios. Si el puente P no ha sido colocado, el conductor (piolín) está aislado y se observa que cargando la botella todas las hojuelas divergen en igual ángulo. La razón de esto es que el potencial tiene en todos los puntos del hilo igual valor, que es el del potencial de la botella. A lo largo del hilo no hay movimiento de electricidad.

Si se coloca el puente P, con lo cual el extremo del hilo adquiere el potencial cero de la tierra, se observa que la divergencia de las hojuelas y, por lo tanto, el potencial, disminuye de izquierda a derecha. En el mismo sentido se mueve la electricidad.

II. La corriente eléctrica. Intensidad: unidades. — Cuando las cargas eléctricas se desplazan en un conductor,

se dice que existe en éste una corriente eléctrica. En el hilo conductor de la fig. 197, fluía, pues, una corriente eléctrica en el sentido que indica la flecha, que es el que va de los potenciales mayores hacia los menores. Es notorio que existe un decrecer, una caída continua de potencial en el sentido de la corriente.

Se llama intensidad de la corriente eléctrica a la cantidad de electricidad que pasa por segundo a través de una sección del conductor por el cual fluye. Si esa cantidad es la unidad electrostática absoluta de masa eléctrica, la corriente tiene la unidad absoluta de intensidad del mismo sistema.

En el sistema práctico o técnico se dice que una corriente tiene la unidad de intensidad, unidad que se llama Ampère, si pasa un Coulomb de electricidad por segundo.

2. La pila como fuente de electricidad. — I. La PILA DE VOLTA. — Alejandro Volta, quien nació en Como en el año 1745 y murió en la misma ciudad el año 1827, construyó

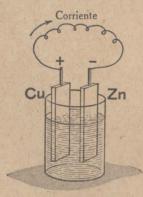


Fig. 198.

en el año 1800, el generador de electricidad (pila) que lleva su nombre.

La pila de Volta está constituída (fig. 198), por una placa de cobre y otra de zinc sumergidas en agua acidulada con ácido sulfúrico, contenida en un vaso de vidrio.

Con un electrómetro puede comprobarse que entre esas placas se establece una diferencia de potencial de 1 Volt, aproximadamente. El potencial mayor corresponde al

cobre, que por esto se llama polo positivo y el menor al zinc, que es el polo negativo. Si se unen las placas por un conductor metálico fluirá por él una corriente eléctrica cuyo sentido es el que va del cobre al zinc. Esa corriente se continúa por el agua acidulada del zinc al cobre. Se tiene, pues, un circuito eléctrico. Al mismo tiempo se advierte un desprendimiento de burbujas que el análisis demuestra son de hidrógeno, quedando, además, otras adheridas a la placa de cobre. Eso revela que se produce una reacción química. Puede comprobarse, por otra parte, que a medida que la pila suministra corriente eléctrica, el peso de la placa de zinc disminuye. Aquella reacción consiste en el ataque del zinc por el ácido sulfúrico, formándose sulfato de zinc y desprendiéndose hidrógeno. Esto es

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2.$$

Si esta reacción se produce en un tubo de ensayo, se desprende calor, que es una de las formas de la energía. En el caso de la pila la energía que se pone en libertad no lo hace en forma de calor sino, en parte a lo menos, en el trabajo de la corriente eléctrica. Ese trabajo eléctrico puede convertirse, como veremos, en calor en un hilo, en trabajo mecánico, químico, etc.

Si en lugar de una pila se utilizan varias, n, p. ejem., conectadas como indica la fig. 199, se obtiene entre las

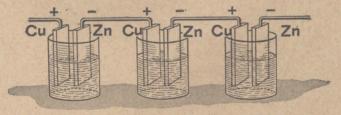


Fig. 199.

placas extremas una diferencia de potencial que es n veces mayor que la diferencia de potencial de una sola.

Volta empleaba con ese fin discos de cobre y de zinc separados por discos de paño embebidos en agua acidulada, de donde proviene el nombre de *pila*, pues resultaba así una pila de discos.

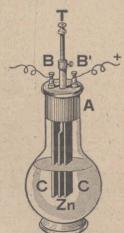
II. LA PILA DE BICROMATO. — En la pila de Volta se observa que la diferencia de potencial entre las placas disminuye con cierta rapidez con su funcionamiento. Esto es debido a que la placa de cobre es "tapizada" por las burbujas de hidrógeno que produce la reacción química, pues si se eliminan las burbujas la pila vuelve a tener entre sus placas la diferencia de potencial primitiva. El electrodo tapizado se dice *polarizado*, extendiéndose la denominación a la pila.

En general, una pila se dice polarizada si por la reacción química el estado de uno o de los dos electrodos ha cambiado y la diferencia de potencial entre ellos se ha hecho inferior a la primitiva. Por lo común, con la pola-

> rización esa diferencia decrece hasta valores muy pequeños y la pila es poco menos que inútil.

> Si por el agregado de una substancia química se impidiese que el hidrógeno se depositase sobre el cobre en el caso de la pila de Volta o, en general, que se alterase el líquido en las vecindades de los electrodos, la diferencia de potencial quedaría constante. Pilas así, que permiten obtener durante un tiempo relativamente grande una corriente constante, se dicen no polarizables.

De entre las pilas no polarizables cabe destacar la pila de Bricromato (fig. 200). Sus electrodos son uno de carbón y el otro de zinc amalgamado y el electrólito está constituído por una solución de bicromato de potasio acidulada con ácido sulfúrico (81 gr. de



bicromato de potasio pulverizado mezclado con 94 cm.³ de ácido sulfúrico y luego diluído en 900 cm.³ de agua destilada). El bicromato tiene por objeto oxidar el hidrógeno que se pone en libertad por el ataque del zinc por el ácido sulfúrico, con lo que se impide, en gran parte, el depósito de sus burbujas sobre el otro electrodo, en este caso de carbón.

La diferencia de potencial entre los electrodos es de 2 volts.

Esta pila se presta muy bien para la observación de los efectos que produce la corriente eléctrica.

3. Fuerza electromotriz de una pila. — Ya dijimos que en el circuito de una pila la corriente fluye en el conductor exterior del polo positivo al negativo y que la corriente se continúa por el interior del líquido de este último al primero. Esto quiere decir, que las líneas de fuerza son cerradas. Una parte de ellas está en el conductor exterior continuándose a través del líquido.

Está claro que si una unidad de carga se mueve sobre una de esas líneas cerradas, las fuerzas eléctricas gastan trabajo. El trabajo que se pone en juego en una vuelta entera es la fuerza electromotriz de la pila. Si por la circulación (una vuelta) de un Coulomb se gasta un trabajo de un Joule la fuerza electromotriz de la pila es de 1 Volt. Esto es lo que pasa, con mucha aproximación, en la pila de Volta. En la de bicromato, ese gasto es de 2 Joule y por eso la fuerza electromotriz es de 2 Volt (operamos redondeando las cifras).

La fuerza electromotriz de una pila es de la misma especie que la caída de potencial entre sus polos, pero no tiene el mismo valor que ésta, sino en el caso en que los polos no están unidos metálicamente. (Prácticamente, cuando la resistencia exterior es muy grande respecto a la interior, véase el apartado siguiente). La caída de potencial entre los polos es el trabajo que gastan las fuerzas eléctricas durante el pasaje de la unidad de carga del polo positivo al negativo por el conductor exterior.

- 4. Intensidad de la corriente. Ya hemos definido la intensidad de la corriente y sus unidades en el N.º 1, apartado II, de este mismo capítulo.
- 5. Efectos de la corriente eléctrica. I. Efectos calóricos. Si unimos los polos de una pila de bicromato con un conductor de cobre que lleve en su parte media un

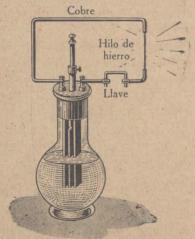


Fig. 201.

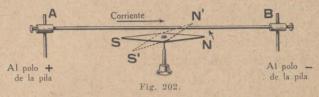
trocito corto de un delgado hilo de hierro (0,1 mm. de diámetro), (fig. 201), veremos que éste se enrojece vivamente y que, por fin, se funde.

Con el uso de las lámparas eléctricas, de planchas y calentadores, todo el mundo sabe que la corriente eléctrica produce calor.

II. Efectos magnéticos. — Oerstedt descubrió en el año 1820 que la corriente eléctrica desvía de su posición ordi-

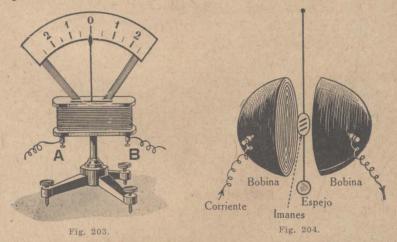
naria a una aguja imantada situada en su proximidad, lo que demuestra que va acompañada de un campo magnético.

Si por una porción horizontal de un conductor de cobre, fig. 202, situado en la dirección que señala una aguja imantada suspendida en su cercanía, se hace pasar una corriente eléctrica, la aguja es desviada en el sentido que indica la flecha, cuando está debajo de la corriente. Si nos ubicamos mirando en la dirección y sentido de ésta, es decir, de A hacia B, veremos que el polo Norte se desvía hacia nuestra izquierda y el Sur, por lo tanto,



hacia la derecha. Si la aguja está arriba del conductor, las desviaciones tienen sentido contrario.

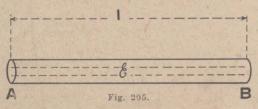
6. Instrumentos de medida. — Aprovechando la acción que ejercen las corrientes sobre los imanes, se construyen aparatos indicadores y de medida. En la fig. 203 está



representado un galvanoscopio multiplicador. La corriente pasa por una bobina cuyas espiras envuelven a una aguja imantada que es capaz de girar en torno a un eje horizontal. Un índice fijo a la aguja señala sobre un sector dividido las desviaciones. En la fig. 204, está representado esquemáticamente un galvanómetro a aguja móvil. De un delgado hilo de cuarzo penden una serie de agujas imantadas, de resorte de reloj, y un espejuelo. En la inmediata priximidad se ncuentran dos bobinas dentro de hemisferios de hierro, por los cuales fluye la corriente eléctrica. El campo magnético que ésta crea, actúa sobre las agujas haciendo desviar la suspensión.

B. LEY DE OHM. LEYES DE KIRCHHOFF

7. Caída de potencial a lo largo de un conductor. — Ya hemos visto en el número 1 del apartado anterior, que el potencial de un conductor disminuye, cae, en el sentido de la corriente que fluye por él. Para que la electricidad se mueva es menester que obre sobre ella una fuerza eléctrica, es decir, que exista un campo eléctrico. El producto de la intensidad de este campo por el desplazamiento de la unidad de carga da, precisamente, la diferencia de poten-



cial. En un conductor rectilíneo de sección circular, p. ejem. (fig. 205), por el cual fluye una corriente eléctrica, el

campo está confinado dentro del mismo. Las líneas de fuerza son las trazadas con líneas de puntos. Son paralelas al eje del cilindro.

Si entre las secciones A y B, que están a la distancia l, la densidad del campo es \mathcal{E} el trabajo que se pone en juego por el pasaje de la unidad de carga entre ellas es $\mathcal{E}l$, y ese trabajo es la diferencia de potencial que existe entre esos lugares. Esa diferencia puede medirse experi-

mentalmente con exactitud con el electrómetro de Lord Kelvin, p. ejem.

8. La ley de Ohm. — En el año 1826 Ohm dedujo de sus experimentos, que si por un conductor sólido, mantenido a temperatura constante, se hacen circular corrientes diferentes, entre las caídas de potenciales en sus extremos y las intensidades respectivas de aquéllas, existe una relación constante, lo que significa que si la diferencia de potencial se duplica, triplica, etc., la intensidad de la corriente se hace, también, doble, triple, etc. Es decir, que si E_1, E_2, \ldots, E_n son las diferencias de potencial entre los extremos del conductor e $I_1, I_2, \ldots I_n$, las intensidades que ellas engendran, respectivamente, se tiene

$$\frac{E_1}{I_1} = \frac{E_2}{I_2} = \dots = \frac{E_n}{I_n} = \text{ constante.}$$

Esa constante que no depende del valor de la intensidad ni, está claro, de la diferencia de potencial, se considera como la medida de una propiedad del conductor a la cual se la denomina resistencia eléctrica. Si se la representa con la letra R, la ley de Ohm se escribe

$$\frac{E}{I} = R \tag{1}$$

$$E = IR. [1']$$

La exactitud de la ley de Ohm ha sido sometida a prueba por gran número de investigadores. De todas las investigaciones llevadas a cabo, resulta que la ley que motiva estas líneas es exacta, en metales y en soluciones, hasta para diferencias de potencial muy grandes.

0

9. Unidades de resistencia. — De acuerdo con la [1] un conductor tiene la unidad de resistencia en un sistema dado cuando actuando entre sus extremos la unidad de diferencia de potencial del mismo sistema fluye por él la unidad de intensidad correspondiente.

En el sistema práctico o técnico esa unidad se llama Ohm y se la representa con la letra Ω . Un conductor tiene, pues, una resistencia de un Ohm cuando existiendo entre sus extremos una diferencia de potencial de un Volt circula por él una corriente de un Ampère.

10. Resistencia en función de las dimensiones del conductor. — La experiencia enseña que la resistencia de un conductor de sección uniforme s y de longitud l está dada por la expresión (1).

$$R = \rho \frac{l}{s},$$
 [2]

donde ρ es una constante que caracteriza a la substancia del conductor que se denomina resistencia específica o resistividad.

Puesto que si l y s son iguales a la unidad, se tiene $R = \rho$, la resistencia específica de un cuerpo es la de un conductor construído con él, de la unidad de longitud y de la unidad de sección.

En la práctica, en lo que a esto se refiere, se usa como unidad de longitud el metro y de sección el milímetro cuadrado. La resistencia específica de un cuerpo es, en ese sistema, la resistencia en Ohm de un conductor construído con él, de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección. Se dan a continuación las resisten-

⁽¹⁾ ρ es la letra griega RHO.

cias específicas de diversos cuerpos a la temperatura de 18° C.

CUERPO	Resistencia de un conductor de 1 m. de longitud y de 1 mm.² de sección (Resisten- cia específica). O H M
Plata	0.016
Cobre	0.017
Oro	0.023
Aluminio	0.032
Hierro	0.098
Platino	0.105
Constantan (1)	0.50

11. Ejercicios. — 1. Aplicando a un calentador eléctrico una diferencia de potencial de 220 Volt, la intensidad de la corriente es de 3 Ampère. ¿Cuál es su resistencia?

Sabemos que por la ley de Ohm es

$$\frac{E \text{ Volt}}{I \text{ Amp.}} = R \text{ Ohm}$$

y, por lo tanto,

$$R = \frac{220 \text{ Volt}}{3 \text{ Amp.}} = 73.3 \text{ } \Omega.$$

2. Por una lamparilla eléctrica de filamento metálico fluye una corriente de 0,25 Ampère siendo la diferencia

⁽¹⁾ El constantan es una aleación de 60 % de cobre y 40 % de níquel.

de potencial o tensión aplicada de 220 Volt. ¿Cuál es la resistencia de su filamento?

$$R = \frac{220 \text{ Volt}}{0.25 \text{ Amp.}} = 880 \text{ }\Omega.$$

3. ¿Cuál es la caída de potencial que existe entre dos puntos de un conductor por el cual fluye una corriente de 25 Ampère si la resistencia comprendida entre esos mismos puntos es de 0,2 Ohm?

Es
$$E \text{ Volt} = I \text{ Amp.} \times R \text{ Ohm}$$

y, por lo tanto,

$$E=25$$
 Amp. $\times 0.2$ Ohm $=5$ Volt.

4. ¿Cuál es la intensidad de la corriente que fluye por una lamparilla de automóvil, si la tensión de la batería es de 6 Volt y la resistencia de su filamento de 1,2 Ohm?

$$I = \frac{6 \text{ Volt}}{1,2 \text{ Ohm}} = 5 \text{ Amp.}$$

5. Por un cable cilíndrico de cobre de 8 mm. de diámetro fluye una corriente de 100 Ampère. ¿Cuál es la caída de potencial entre dos puntos que están a 1 km. de distancia?

Debemos calcular primero la resistencia.

Es
$$R = \rho \frac{l}{s}$$

donde $\rho = 0.017$ Ohm por metro de longitud y mm.² de

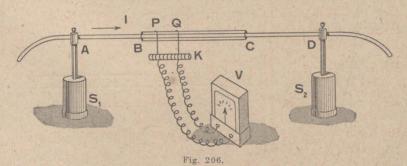
sección; l=1.000 metros, y $s=\pi r^2$ si r se expresa en milímetros. Se tiene

$$s=\pi r^2=\pi.4^2=\pi.16=50,24\,$$
 mm.²
$$R=0,017\frac{1.000}{50.24}=0,338\,$$
 Ohm

y finalmente, la caída de potencial buscada E es

$$E = 100 \text{ Amp.} \times 0,338 \text{ Ohm} = 33,8 \text{ Volt}$$

12. Experimentos de curso. — La instalación de la fig. 206 permite hacer algunas comprobaciones referentes a la ley de Ohm. Una corriente eléctrica de intensidad I fluye por un conductor constituído por trozos cilíndricos de diferentes substancias. Entre A y B el hilo es de cobre,



entre B y C se encuentran dos hilos idénticos de hierro y entre C y D uno de constantan. Mediante el dispositivo móvil K puede conectarse un voltímetro entre los puntos P y Q de los hilos separados por una distancia constante. Aplicando a K sobre el hilo de cobre, el voltímetro acusa una caída de potencial menor que cuando se le sitúa sobre los otros hilos. Si la distancia PQ se duplica, de-

jando constante a I, las caídas de potencial correspondientes a los diferentes conductores, se hacen dobles



también. Si al operar sobre la sección BC del conductor se hace contacto en uno de los hilos solamente, el voltímetro acusa una diferencia de potencial doble que cuando se tocan los dos hilos simultáneamente.

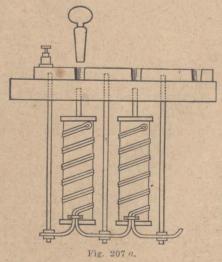
13. Ohm internacional. En el congreso de electri-

cistas reunido en París en el año 1893, se estableció que un Ohm es la resistencia de una columna de mercurio de un milímetro cuadrado de sección y de 106,3 cm. de

longitud. Ese Ohm se llama internacional.

Para los fines experimentales y de los laboratorios, se construyen resistencias metálicas cuyos valores se determinan con gran exactitud, por lo que se denominan normales,

En las cajas de resistencias a clavijas (figura 207), los conductores doblados en dos (figura 207 a), se arrollan sobre pequeños carretes,

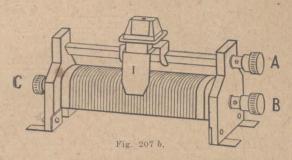


terminando sus extremos en conductores de bronce macizo que están unidos a las recias piezas de ese mismo

metal que lleva la tapa y entre las cuales calzan las clavijas. Retirando a éstas, las resistencias quedan intercaladas en el circuito.

La fig. 207 *b* representa un tipo usual de resistencia variable. Un hilo de manganina o de constantan está

arrollado sobre un cilindro de porcelana o sobre una barra de pizarra rematando sus extremos en dos bornes B y C. Una pieza metálica I se



desliza sobre una varilla conductora de sección triangular, manteniéndose siempre en contacto con la resistencia. La varilla lleva en uno de sus extremos un borne A. Si la tensión se conecta entre A y B, la resistencia intercalada es la del hilo comprendido entre I y B, la cual se varía desplazando I. Conectando B y C con una tensión dada es posible obtener entre A y B una caída de potencial cualquiera.

14. Bifurcación de una corriente. — I. GENERALIDADES. — Supongamos que se tiene un circuito eléctrico como el que enseña la fig. 208.

El flúido eléctrico sale por el polo positivo, sigue moviéndose en el sentido de las flechas, en A se distribuye entre los dos conductores que arrancan de allí, como lo hace el agua cuando el canal en que corre desemboca o se bifurca en dos nuevos canales, llega al polo negativo y por dentro del líquido continúa su circulación hacia el otro polo. La corriente se bifurca, pues, en A y luego en B sigue otra vez por un solo conductor.

De los conductores que están entre A y B, cuyas resistencias son r_1 y r_2 , se dice que están en derivación.

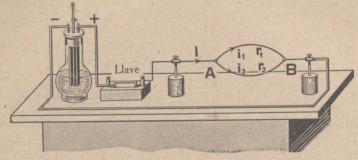


Fig. 208.

II. Primer hecho y primera relación fundamental. — Puesto que el flúido eléctrico que llega a A, no se acumula allí sino que se distribuye totalmente entre los dos conductores por los cuales continúa moviéndose, se sigue que si I es la intensidad de la corriente antes de A e i_1 e i_2 , las intensidades en los conductores en derivación es

$$I = i_1 + i_2.$$
 [3]

III. Segundo Hecho y segunda relación fundamental. — Puesto que el potencial en un punto de un campo eléctrico tiene un único valor, tanto en A como B sucede tal cosa. La diferencia de potencial entre A y B es la misma, tanto si pasamos de un punto a otro a lo largo del conductor de resistencia r_1 como si lo hacemos a lo largo del conductor de resistencia r_2 . Si llamamos E a la diferencia de potencial entre A y B se tiene, por lo tanto, de acuerdo con lo que terminamos de decir y la ley de Ohm

 $E = i_1 r_1$ $E = i_2 r_2$

y, por consiguiente,

$$i_1r_1 = i_2r_2$$
 [4]

IV. Deducción de los valores de las intensidades de las corrientes derivadas. — Mediante las relaciones [3] y [4] se pueden calcular los valores de i_1 e i_2 en función de la intensidad total y de las resistencias r_1 y r_2 . Así queda determinada la distribución del flúido eléctrico en los dos conductores en derivación.

De la [4] resulta

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}$$
 [5]

y, por una conocida propiedad de las proporciones

$$\frac{i_1 + i_2}{i_1} = \frac{r_1 + r_2}{r_2} \tag{6}$$

y, puesto que por la [3] es $i_1 + i_2 = I$, la [6] da

$$i_1 = I \frac{r_2}{r_1 + r_2}$$
. [7]

De la misma manera resulta

$$i_2 = I \frac{r_1}{r_1 + r_2}$$
 [8]

Si se quiere, p. ejem., que por la rama 1 fluya solamente la décima parte de la corriente I, es suficiente con dar a r_1 un valor igual a nueve veçes r_2 . Por ejemplo, si es $r_2 = 10 \ \Omega$ debe ser $r_1 = 90 \ \Omega$, pues así se tiene

$$i_1 = I - \frac{10}{90 + 10} = I - \frac{1}{10}.$$

Estos resultados tienen mucha aplicación en los instrumentos de medida, en particular en los amperímetros.

V. — Cálculo de la resistencia. — Los dos conductores en derivación entre los puntos A y B equivalen a una resistencia óhmica única cuyo valor se calcula fácilmente. La [3], que es,

$$I=i_1+i_2$$

puede escribirse así

$$I = \frac{i_1 r_1}{r_1} + \frac{i_2 r_2}{r_2}.$$
 [9]

Pero, por lo que vimos en el apartado III es, $i_1r_1 = i_2r_2 = E$, siendo E la diferencia de potencial entre A y B y, por consiguiente,

$$I = \frac{E}{r_1} + \frac{E}{r_2} = E \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right]$$
 [10]

La resistencia R a que equivalen los dos conductores en derivación debe ser tal que

$$I = \frac{E}{R}$$
 [11]

Por comparación, de las [10] y [11] resulta

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \tag{12}$$

de modo que la recíproca de la resistencia a que equivalen las dos resistencias en derivación es igual a la suma de las recíprocas de éstas.

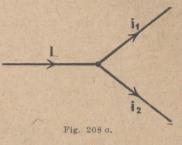
Si las dos resistencias son iguales, esto es, si $r_1 = r_2$,

resulta $R = \frac{r}{2}$. La resistencia total es igual a la mitad de

una sola. Si las resistencias fuesen n e iguales, equivaldrán a una sola resistencia de valor r/n.

15. Leyes de Kirchhoff. — I. Primera regla. — La primera regla de Kirchhoff no es sino la primera relación fun-

damental que fluye del primer hecho del mismo carácter que expusimos en el apartado II del número anterior. La electricidad que llega a un punto de bifurcación, no se acumula en él sino que sigue totalmente por los conductores que parten de ese punto.



Por lo tanto, si se consideran positivas las corrientes que convergen a un punto y negativas las que divergen de él (fig. 208 a), la suma debe ser cero. Es decir que

$$I - i_1 - i_2 = 0 ag{13}$$

que es la expresión de la primera regla de Kirchhoff.

II. SEGUNDA REGLA DE KIRCHHOFF (¹). — Esta regla que generalizaremos más adelante, podemos presentarla aquí como una consecuencia de la segunda relación fundamental del apartado III del número 14.

De acuerdo con la [4], en un circuito cerrado, como el comprendido entre A y B, fig. 208, la suma de los productos de las intensidades de las corrientes por las resistencias es nula. Se tiene en efecto

$$i_1 r_1 - i_2 r_2 = 0. ag{14}$$

Si hubiese entre A y B alguna fuerza electromotriz, esa expresión no es igual a cero.

C. PILAS

16. La ley de Ohm en el circuito cerrado de una pila. — La ley de Ohm tal como la formulamos, dice que la dife-

⁽¹⁾ El programa oficial parece que sólo pide la primera regla.

rencia de potencial, vale decir, el trabajo que gastan las fuerzas eléctricas por el transporte de la unidad de carga entre los extremos (o dos puntos) de un conductor dividido por la intensidad de la corriente es una constante del conductor.

Si consideramos el circuito total de la pila constituído por el conductor exterior y por el conductor interior, e imaginamos un corte virtual en un lugar cualquiera, el trabajo que gastan las fuerzas eléctricas por el transporte de la unidad de carga de un extremo del conductor al otro (extremos del corte virtual) no es sino la fuerza electromotriz de la pila. Por lo tanto, es como antes,

$$I = \frac{E}{R}$$

donde E es la fuerza electromotriz de la pila y R la resistencia total del circuito. Esta resistencia está compuesta por la resistencia del conductor exterior que llamaremos r_e y por la resistencia interior que representaremos con r_i , siendo $R = r_e + r_i$.

Es, pues,

$$E = IR = I (r_e + r_i)$$

o también

$$E = Ir_e \left[1 + \frac{r_i}{r_e} \right] \tag{15}$$

El producto Ir_e es, por la misma ley de Ohm, la caída de potencial entre los extremos del conductor exterior, es decir, entre los polos o bornes de la pila.

La [15] hace, pues, notorio que la fuerza electromotriz de la pila es igual a la caída de potencial entre sus polos ($Ir_{\rm e}$) cuando la resistencia exterior $r_{\rm e}$ es muy grande respecto a la interior $r_{\rm i}$.

17. Pila Leclanché. Pilas secas. — El electrodo positivo consiste (fig. 209) en un cilindro de una mezcla de carbón pulverizado y bióxido de manganeso $(M_n O_2)$, pren-

sada. El negativo es un cilindro de zinc y el electrólito una solución de clorhidrato de sal de amoníaco (cloruro amónico ClNH₄). La fuerza electromotriz, que es de 1,6 Volt, disminuye rápidamente en circuito cerrado porque el despolarizante, que es el bióxido de manganeso, obra lentamente. Una vez abierto el circuito, por la acción del bióxido, la pila recobra su fuerza electromotriz. Por ese motivo es muy usada en instalaciones en

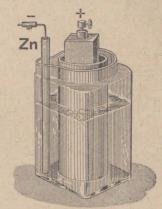


Fig. 209.

las cuales el circuito está cerrado por breves instantes, como sucede en la de los timbres.

Las pilas secas no son sino pilas Leclanché en las cuales el electrólito ha sido mezclado, hasta convertirlo

en una papilla, con arena, aserrín o polvo de corcho.



Fig. 209 a.

18. Otras pilas. — Además de las pilas de Volta y de Bicromato, que se han descripto en el N.º 2 de este capítulo, podemos citar las pilas de Daniell y de Bunsen y la pila normal de Weston.

En la fig. 209 a se ha representado la pila de Daniell. Dentro del vaso de

vidrio existe un vaso poroso que contiene un electrodo de cobre y una solución de sulfato del mismo metal. Entre ambos vasos se halla un electrodo de Zn en una solución

de ácido sulfúrico. El despolarizante es, en esta pila, la solución de sulfato de cobre. El hidrógeno que se produce por la reacción entre el ácido sulfúrico y el zinc, reem-

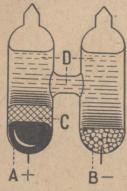


Fig. 210.

plaza al cobre de aquella sal y regenera al ácido sulfúrico.

La fuerza electromotriz es 1,2 Volt, aproximadamente, y la resistencia interior es de 0.5Ω .

La pila de Bunsen se diferencia de la de Daniell en que lleva dentro del vaso poroso un electrodo de carbón y una solución de ácido nítrico. La fuerza electromotriz es de 1,9 Volt, aproximadamente, y la resistencia interior de 0,1 a 0,2 Ω .

La pila de Weston se dice normal

porque su fuerza electromotriz está perfectamente definida y depende muy poco de la temperatura. La fig. 210, la representa esquemáticamente. El recipiente tiene la forma de una H. A través de sus ramas inferiores lleva soldados dos conductores de platino. En el fondo del tubo de una de las ramas hay mercurio puro; en el otro, una amalgama de mercurio y cadmio. Aquel metal constituye el electrodo positivo y esta amalgama el electrodo negativo.

Sobre el mercurio va una capa de sulfato de mercurio y sobre la amalgama cristales de sulfato de cadmio.

La fuerza electromotriz a 20° C es

E = 1,0184.

Su valor se conserva invariable mientras funciona siempre que la corriente que fluye por el circuito que ella alimenta sea inferior a 1:20.000 Ampère.

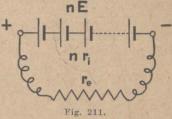
19. Acoplamientos. — I. Generalidades. — Las pilas se representan con dos guiones verticales, uno de ellos más

largo y delgado que el otro. Ese guión representa el polo positivo.

Las clases de acoplamiento son tres: En serie, en paralelo o cantidad, y en oposición. Los mixtos no son sino, como su nombre lo dice, combinaciones de éstos.

I. Acoplamiento en serie.

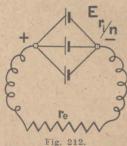
— El acoplamiento de la fig.
199 era un acoplamiento de
esta clase, que lo representamos ahora esquemáticamente



en la fig. 211. Si los elementos, que suponemos idénticos, son n, la fuerza electromotriz es nE, si E, es la fuerza electromotriz de uno de ellos, mientras que la resistencia interior es nr_i , si r_i es la de un elemento. La intensidad de la corriente será, pues,

$$I = \frac{nE}{r_e + nr_i}.$$

II. Acoplamiento en paralelo. — Si se unen todos los polos positivos y los negativos, respectivamente, entre sí



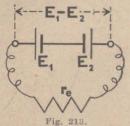
(fig. 212), el acoplamiento se dice en paralelo o cantidad. La fuerza electromotriz es la de un elemento, puestodo sucede como si fuese uno solo *n* veces mayor.

Entre los polos existen n resistencias r_i en derivación, que equivalen a una sola resistencia (véase el número 14, apartado V), de valor

r_i/n. La intensidad de la corriente será

$$I = \frac{E}{r_i/n + r_e}.$$

III. Acoplamiento en oposición. — Un acoplamiento como el de la fig. 213 se dice en oposición. Si los elementos son idénticos, la fuerza electromotriz es nula. Si son dife-



rentes, es la diferencia de las fuerzas electromotrices de ellos.

20. Ejercicios. — 1. El circuito de una pila de bicromato ha sido cerrado con un conductor de 2 Ohm. ¿Cuál es la intensidad de la corriente?

La fuerza electromotriz de esa pila es, en números redondos, de 2 Volt y la resistencia interior 0.05 Ohm.

Es, por lo tanto,

$$I = \frac{2 \text{ Volt}}{(2 + 0.05) \text{ Ohm}} = 0.975 \text{ Amp.}$$

2. Se han conectado en serie tres pilas de bicromato y se ha cerrado el circuito con una resistencia exterior de 10 Ohm. ¿Cuál es la intensidad de la corriente?

La fuerza electromotriz de la batería que así resulta, es de 6 Volt y su resistencia interior, $3\times0,05=0,15$ Ohm. Es, pues,

$$I = \frac{6 \text{ Volt}}{(10 + 0.15) \text{ Ohm}} = 0.59 \text{ Amp.}$$

3. Tres pilas idénticas de Daniell se han conectado en paralelo y se han unido los bornes de la batería que así resulta con un conductor de 10 Ohm. ¿Cuál es la intensidad de la corriente que fluye por el circuito?

La fuerza electromotriz es la misma de una sola pila, es decir, 1,2 Volt, en números redondos.

La resistencia interior es la de tres resistencias iguales en derivación. Como cada una de ellas es de $0,15~\Omega$, el de la resistencia a que equivalen, es la tercera parte, esto es, $0,05~\Omega$.

La intensidad es por consiguiente

$$I = \frac{1,2 \text{ Volt}}{10,05 \text{ Ohm}} = 0,12 \text{ Amp.}$$

D. PILAS TERMOELÉCTRICAS

21. Efecto Seebeck. — En el año 1821 Seebeck observó que situando una placa de cobre sobre una de antimonio y uniéndolas con conductores del primer metal a un galvanómetro, éste acusaba una desviación tan pronto como se establecía una diferencia de temperatura entre las dos superficies de contacto cobre - antimonio y antimonio - cobre.

Ese fenómeno puede hacerse ostensible fácilmente con el aparato que enseña la fig. 214, en el cual dos barras de diferentes metales, de sección rectangular, soldadas por sus extremos constituyen por dobladura de una de ellas, un circuito cerrado en cuya malla está suspendida una aguja imantada paralelamente y muy

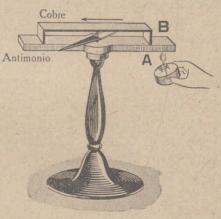
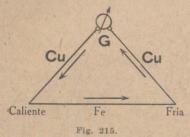


Fig. 214.

próxima a uno de los conductores. Si se orientan las barras en la dirección del meridiano magnético y se calienta una de las soldaduras, la A, p. ejem., se observa, en seguida, una desviación de la aguja que corresponde a una corriente que en la soldadura más caliente va del cobre al

antimonio. También puede ponerse de manifiesto el hecho del cual nos ocupamos uniendo los extremos de un hilo de hierro a hilos de cobre que se conectan con un galva-



nómetro (fig. 215). Si uno de los puntos de contacto está a mayor temperatura que el otro, el galvanómetro acusa el pasaje de una corriente eléctrica cuyo sentido es el que va, en el hierro, del punto más caliente al más frío.

A esas corrientes engen-

dradas por diferencias de temperatura en un circuito metálico heterogéneo se les llama termoeléctricas y al dispositivo en que se generan, es decir a la unión de dos metales, termoelemento o pila termoeléctrica.

Cualesquiera sean los metales con que se opere, sucede, en general, lo que acabamos de explicar. Si se construye una pila con dos cualquiera de la siguiente serie de metales

se comprobará que en la soldadura más caliente, la corriente va del metal que en la serie está situada a la derecha al que está colocado a la izquierda.

Por otra parte, para una misma diferencia de temperatura la fuerza electromotriz es tanto mayor cuanto más distantes están en la serie los metales que constituyen la pila.

La fuerza electromotriz crece con la diferencia de temperatura, alcanza un máximo, luego decrece, llega al valor cero y luego se hace negativa.

Las pilas termoeléctricas tienen infinidad de aplicaciones. Pueden, con ellas, p. ejem., medirse temperaturas calibrándolas previamente. Temperaturas elevadas se miden, p. ejem., con un termoelemento constituído por la soldadura de platino, con platino-radio.

CAPITULO XII

ENERGÍA DE LA CORRIENTE

1. Trabajo de las fuerzas eléctricas en la corriente eléctrica. — Supongamos que por el conductor AB (fig. 216), que forma parte de un circuito eléctrico, fluye una corriente de I Ampère y que la diferencia de potencial entre los puntos A y B es VA — VB = E Volt. De acuerdo con la definición de Volt, esto quiere decir que por el transporte de un Coulomb de electricidad entre aquellos puntos, las fuer-



zas eléctricas gastan *E* Joule de trabajo. Siendo la intensidad de la corriente de *I* Ampère pasan *I* Coulomb por segundo y, por consiguiente, en *t* segundos *It* Coulomb. El trabajo puesto en juego en ese tiempo es, pues,

$$A = EIt$$
 Joule, [1]

si E se escribe en Volt, I en Ampère, y t en segundos. La definición de Volt que hemos dado varias veces puede escribirse también así

1 Joule = 1 Volt \times 1 Amp. \times 1 segundo.

La [1] da el trabajo que las fuerzas eléctricas gastan entre A y B, en la corriente eléctrica, cualquiera sea la naturaleza del circuito entre esos dos puntos.

El trabajo que gastan por segundo, trabajo que recibe el nombre de potencia, es

$$P = \frac{A}{t} = EI$$
 [2]

La unidad de potencia en el sistema práctico o técnico, unidad que se denomina Watt, es el trabajo que se gasta por segundo entre dos puntos de un circuito si siendo la intensidad de la corriente de un Ampère la diferencia de potencial es de un Volt. Es decir que

1 Watt = 1 Volt \times 1 Amp.

Las compañías venden la energía eléctrica en *Kilowatt-hora*, que representa un consumo de mil Joule por segundo durante una hora. Es decir que

1 Kilowatt - hora = 3.600.000 Joule.

2. Ley de Joule. — Si entre los puntos A y B no se realiza otro proceso que el de la conducción, es decir, si no se producen entre A y B procesos que impliquen realizar trabajo mecánico o químico, etc., todo el trabajo de las fuerzas eléctricas se consume en vencer la resistencia óhmica, lo que se manifiesta en la producción de calor, fenómeno que recibe el nombre de efecto Joule.

La cantidad de calor está dada, pues, en este caso, por la misma expresión [1]. Conviene, sin embargo, introducir la resistencia óhmica, porque es al calor que en ella se produce al que nos referimos. Eso se logra recordando que por la ley de Ohm es

$$E = IR$$

expresión que introducida en la [1] da

$$A = Q = I^2Rt$$
 Joule, [3]

si indicamos con Q la cantidad de calor producido, que está dado en Joule. Recordando que

1 Joule =
$$\frac{1}{9.806}$$
 Kgm.

y que

la [3] se convierte en

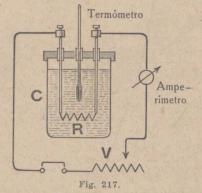
$$Q = 0.24 I^2 Rt$$
 gramo - calorías [4]

que es la ley de Joule. La cantidad de calor que produce una corriente en un conductor es, pues, proporcional al cuadrado de su intensidad, a la resistencia óhmica de aquél y al tiempo.

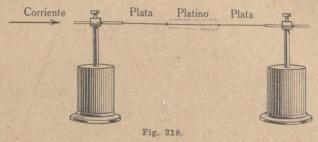
3. Experimentos. — Esa ley se comprueba midiendo con un calorímetro de agua C (fig. 217), la cantidad de calor

que cierta intensidad I produce en un tiempo t en una resistencia R tendida entre dos conductores cilíndricos de cobre. La resistencia variable V permite variar I. La dependencia de R se comprueba sustituyendo ésta por otra resistencia de diferente valor.

Un experimento de curso que permite poner de manifiesto la influencia de los des-



iguales valores de las resistencias y en el caso de hilos de la misma sección y longitud la de la desigual resistencia específica en la producción de calor, de acuerdo con la [4], es el que representa la fig. 218. Un trozo de hilo de platino está entre dos hilos de la misma sección de plata. Si para cierta intensidad de corriente el hilo de platino ha comenzado a ponerse incandescente, nada se advierte, a simple vista en los de plata.



4. Corto circuito. — Calcularemos un corto circuito en una plancha eléctrica (fig. 219), pues el fenómeno es el mis-

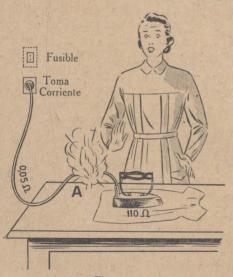


Fig. 219.

mo en todos los casos.

Calienta la plancha el calor que produce una resistencia aislada con mica que lleva en su interior.

En la práctica la diferencia de potencial *E* o, como se dice, la tensión está dada en el toma corriente (220 Volt en nuestras ciudades), por lo que conviene introducirla en la [4]. Basta eliminar *I* mediante la ley de Ohm. Resulta

$$Q=0.24 \frac{E^2}{R} t \;\; {
m gramo}$$
 - calorías.

Si la plancha consume 2 Ampère su resistencia interior es

$$R = \frac{220 \text{ Volt}}{2 \text{ Amp.}} = 110 \text{ Ohm.}$$

La resistencia del cordón es muy pequeña. Puede estimarse, a lo sumo, en 0,05 Ohm.

La cantidad de calor que recibe la plancha por segundo es

$$Q = 0.24 \frac{220^2}{110} = 105,6$$
 gramo - calorías.

Si el cordón se retuerce y los conductores de cobre se tocan en A (fig. 219), queda excluída del circuito la resistencia interior de la plancha. La tensión obrará, pues, sobre los 0,05 de Ohm de la resistencia del cordón, por lo que se dice que se ha producido un corto circuito. La cantidad de calor que se engendraría en tal caso por segundo, si durasen esas condiciones sería (¹):

$$Q=0.24rac{220^2}{0.05}=232.320\,$$
 gramo - calorías.

Esa enorme cantidad de calor es capaz de producir, como suele hacerlo, un incendio.

5. Fusibles. — Si en los conductores de la red eléctrica que va al toma corriente (fig. 219) en el cual está conectada la plancha se coloca un hilo delgado de plomo, plata, etcétera, que se funde cuando la corriente pasa de 5 Amp., p. ejem., interrumpiendo así el circuito, no se habría producido la enorme cantidad de calor que calculamos con

⁽¹⁾ Este cálculo es teórico, pues la energía que puede ponerse en libertad, depende de la potencia total que pueden suministrar las máquinas que alimentan la red. Es s.n embargo muy ilustrativo.

lo que desaparece todo peligro. Dispositivos de esa especiereciben el nombre de *fusibles*. Todas las instalaciones eléctricas están provistas de un buen número de fusibles de alcance diferente, convenientemente distribuídos.

6. Aplicaciones. — I. Planchas. Calentadores. Lámparas a filamento incandescente. — El funcionamiento de las planchas y calentadores no requiere mayores explicaciones. De las primeras nos hemos ocupado en el número anterior.

La aplicación del efecto Joule que más resonancia tuvo en su época fué la producción de luz, que por eso se llamó luz eléctrica. Fué Édison el primero en producir esa luz poniendo incandescente, mediante una corriente eléctrica, un filamento de carbón contenido en una ampolla de vidrio en la cual se había hecho alto vacío. Como esas lámparas son poco económicas y ofrecen otros inconvenientes, hoy día se las construye de filamento metálico. Se trata de hilos muy delgados de 0.02 a 0.03 mm. de diámetro de tántalo, tungsteno, etc. La luz es tanto más blanca cuanto mayor es la temperatura del filamento. La disgregación de éste, que se produce cuando la temperatura pasa de 2.000°, lo que ocasiona el ennegrecimiento del vidrio, se evita, en gran parte, llenando la ampolla con un gas inerte, tal como nitrógeno. En estas lámparas se puede elevar la temperatura hasta unos 2.600° C, obteniéndose una luz muy blanca. Consumen, aproximadamente medio Watt por bujía y tienen una duración de 700 horas.

II. Arco voltaico. — Una corriente eléctrica que pasa por dos barras de carbón que se tocan, sigue pasando si se apartan éstos lentamente unos milímetros, siempre que la diferencia de potencial sea de unos 30 Volt. Por la gran resistencia que opone el lugar del contacto de los carbones, éstos se ponen allí incandescentes. Prodúcese así una atmósfera de partículas de carbón y gases calientes, por la cual pasa la electricidad. Se produce, pues, entre los carbones un arco luminoso que Davy llamó arco voltaico.

La temperatura es mayor en el carbón que es el polo positivo (3.000°C) que en el otro (2.300°C) por lo que se

consume más rápidamente a la vez que se ahueca formando un cráter (fig. 220). Por esa razón en las lámparas de arco alimentadas con corriente continua, los diámetros de los carbones positivos y negativos están en la razón de 3 a 2.

La intensidad luminosa de las lámparas de arco es muy grande, del orden de las 50.000 bujías.

Como por la combustión los carbones se hacen más cortos, se emplean mecanismos reguladores, que son verdaderos dispositivos de relojería, que los ponen en contacto cuando el arco está

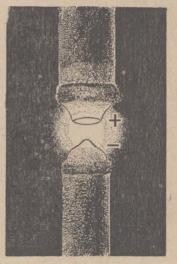


Fig. 220.

apagado y los mantiene a distancia adecuada cuando está encendido.

III. Soldadura. — En la práctica se presenta, con mucha frecuencia, la necesidad de soldar piezas de hierro, tales como tubos de calderas, uniones entre riel y riel, etc. Se emplea, en tales casos, un arco entre dos barras de hierro. No hay persona que no haya visto emplear tal arco, que da una luz azulada extraordinariamente brillante, en las vías de los tranvías de la ciudad.

7. Otra aplicación. Instrumentos de medida a hilo caliente. — La dilatación que experimenta un hilo delgado por el

La dilatación que experimenta

termina en M. Éste, a su vez, está tendido por otro hilo que pasa por la garganta de la polea P, a la cual envuelve una vez, y que está fijo por el otro extremo en un resorte R constituído por una barra

de sección rectangular de bronce fosforado. Si GF se

dilata, la tracción prove-

niente del resorte R des-

calor del efecto Joule que engendra una corriente que fluye por él, se aprovecha en la construcción de instrumentos de medición eléctrica. La fig. 221 representa esquemáticamente el principio de la construcción. La corriente fluye por el hilo FG, de cuyo punto medio O parte otro que

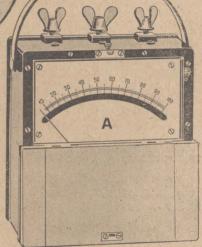


Fig. 222.

plaza, en su dirección, al hilo que pasa por la polea, porque O baja, y el índice I gira, acusando así el pasaje de

la corriente. En la fig. 222 se puede ver el aspecto exterior de los instrumentos de este tipo tal cual los construye la casa Hartmann y Braun.

Puesto que el efecto térmico depende del cuadrado de la intensidad, estos instrumentos acusan tanto el pasaje de corriente continua como el de corriente alterna.

8. Ejercicios. — 1. ¿Cuál es el consumo en 30 horas (1 hora por día durante 30 días) de una plancha eléctrica por la cual fluye una corriente I=2 Ampère, siendo la tensión E de 220 Volts?

Puesto que el trabajo A que gastan en t segundos las fuerzas eléctricas está dado por la expresión:

A Joule =
$$E$$
 Volt $\times I$ Amp. $\times t$ segundo

y una hora tiene 3.600 segundos, el consumo es

$$A = 220 \times 2 \times 30 \times 3.600 = 47.520.000$$
 Joule.

Como ya lo hemos dicho, las compañías venden la energía eléctrica en *Kilowatt-hora*, que representa un consumo de 1.000 Joule por segundo durante una hora, es decir, en total, 3.600.000 Joule, aquel consumo A es, en Kilowatt-hora

$$A=rac{220 imes2 imes30}{1.000}=$$
 13,2 Kilowatt - hora.

Si suponemos una tarifa de 32 centavos por Kilowatthora, el gasto es

$$A=4,22$$
 pesos.

2. ¿Cuál es el consumo en 100 horas de una lámpara de medio Watt de 100 bujías y de 220 Volt, la resistencia de su filamento y la intensidad de la corriente que fluye por él?

Siendo la lámpara de medio Watt por bujía, se emplea en ella una potencia

$$P = 100 \times 0.5 = 50$$
 Watt

o, lo que es lo mismo, consume por segundo 50 Joule. En 100 horas el trabajo es

$$A=50\times100\times3.600$$
 Joule

o, en Kilowatt - horas,

$$A=5$$
 Kilowatt - hora

que con una tarifa de 32 centavos representa un gasto

$$A=1,60$$
 pesos.

Puesto que el trabajo por segundo, es decir la potencia P, está dada por la expresión

$$P$$
 Watt = E Volt $\times I$ Amp.

se sigue que

$$I = \frac{P}{E} = \frac{50}{220} = 0,227$$
 Amp.

La resistencia del filamento es

$$R = \frac{220}{0,227} = 969,1$$
 Ohm.

CAPITULO XIII

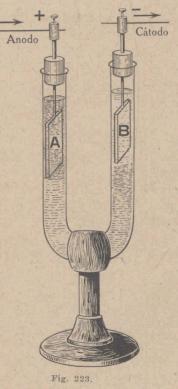
ELECTRÓLISIS

1. Generalidades. — Existen cuerpos en los cuales el proceso de la conducción de la electricidad va acompañada

de una separación macroscópica de los elementos o grupos que lo constituyen. Esos cuerpos se designan con el nombre de conductores de segunda especie o electrólitos. El proceso de esa separación de elementos de un electrólito por la corriente eléctrica se llama electrólisis.

Son electrólitos las soluciones de ácidos, de bases y de sales en agua y en algunos disolventes, tales como el alcohol y amoníaco líquido, p. ejem., y las sales fundidas.

Los dispositivos adecuados a la producción de la electrólisis reciben el nombre de voltámetros. En la fig. 223 se ha representado uno muy simple, que se presta para las demostraciones de clase.



Las placas A y B se llaman electrodos. El electrodo por donde entra la corriente, que está conectado, por lo

tanto, con el polo positivo, se llama ánodo y el otro, por el cual la corriente sale, cátodo.

- 2. Electrólisis de sulfato de cobre. Si las láminas A y B son de cobre y el electrólito es una solución de sulfato del mismo metal (fig. 223), el pasaje de cierta cantidad de electricidad, es decir, de una corriente eléctrica durante un tiempo, produce los siguientes cambios.
- 1.º El cátodo B experimenta un aumento de masa, que representaremos con M.
- 2.º El ánodo experimenta una disminución de masa igual al incremento M de la masa del ánodo.
- 3.º La solución se aclara en la vecindad del cátodo y se obscurece en la del ánodo, lo que es trasunto de una disminución y de un aumento local, respectivamente, de la concentración. El análisis revela, en este caso, sin embargo, que la concentración media de la solución permanece invariable.

Esos hechos se explican de este modo: en el electrólito el átomo de cobre y el radical sulfato se *disocian*, es decir, *se separan* en el acto de la disolución. El primero queda cargado positivamente y el segundo negativamente,

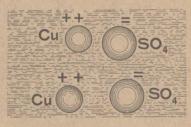


Fig. 224.

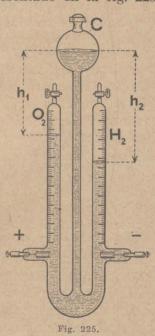
como enseña la fig. 224. Ya veremos que la electricidad, tanto la positiva como la negativa está compuesta por átomos, granos elementales o cuantas (de los tres modos puede decirse). El cobre queda cargado con dos átomos de electricidad positiva y el

radical sulfato con dos átomos de electricidad negativa. El primero es llevado por la fuerza eléctrica hacia el polo negativo o cátodo, y el segundo hacia el ánodo donde combinándose con el cobre que lo constituye, forma sulfato de cobre que se disuelve en el líquido circundante. Los átomos en el estado ordinario son neutros. Un átomo o núcleo atómico cargado recibe el nombre de *ion*. En el caso que consideramos se tienen dos iones: el ion positivo cobre y el ion negativo radical sulfato.

3. Electrólisis del agua. — Se habla impropiamente de electrólisis del agua, pues se trata como se verá, de la del ácido sulfúrico diluído. Un voltámetro muy cómodo para la electrólisis del agua es el representado en la fig. 225,

cuyos electrodos son de platino. Abriendo las llaves que se ven en el dibujo, se deja llenar con la solución de ácido sulfúrico diluído que se ha vertido en *C*, los dos tubos laterales.

Si se hace pasar una corriente eléctrica por el electrólito comienzan a desprenderse burbujas de los electrodos, las cuales ascienden por la columna líquida ocupando la parte superior de los tubos. El análisis revela que esos gases son oxígeno e hidrógeno, respectivamente. El primero se desprende en el ánodo y el segundo en el cátodo. Las presiones a que se encuentran es la atmosférica más las alturas h_1 y h_2 , respectivamente, reducidas a



milímetros de mercurio. Si se reducen esos volúmenes a 0°C y a la presión normal, se advierte que el volumen del hidrógeno, es el doble que el del oxígeno.

Esos hechos se explican de este modo: el ácido sulfúrico al diluirse se disocia formándose un ion hidrógeno

con dos átomos de electricidad positiva (H_2) y un ion radical sulfato con dos átomos de electricidad negativa (SO_4) . Las fuerzas eléctricas llevan al ion positivo hacia el cátodo o polo negativo y el ion negativo hacia el ánodo o polo positivo. Este ion sulfato ataca allí al agua formando ácido sulfúrico y desprendiendo oxígeno, de acuerdo con la siguiente reacción:

$$2SO_4 + 2H_2O = 2H_2SO_4 + O_2$$

- 4. Las leyes de Faraday. Los fenómenos de la electrólisis obedecen a las dos leyes siguientes que fueron enunciadas por Faraday en el año 1833.
- 1.ª Ley. La masa de la substancia librada por las fuerzas eléctricas en uno cualquiera de los electrodos es proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado por el electrólito, vale decir, al producto de la intensidad por el tiempo.

Si se representa con M esa masa, esa ley se escribe así:

$$M = Cq = CIt,$$
 [1]

siendo q la cantidad de electricidad, I la intensidad de la corriente y t el tiempo.

La magnitud C es la constante de proporcionalidad, la cual caracteriza al cuerpo. Se la denomina equivalente electroquímico del cuerpo.

Puesto que, por lo común, en la electrólisis se expresan las cantidades de electricidad en Coulomb, el equivalente electroquímico de un cuerpo es la masa expresada en gramos, que libra un Coulomb de electricidad o, lo que es lo mismo, una corriente de un Ampère en un segundo.

Cuidadosas mediciones dan para la plata monovalente, como lo es en el nitrato de plata $(AqNO_3)$, P el valor

C = 0.001118 gramo.

2.ª Ley. — Las masas de dos substancias diferentes libradas por cantidades iguales de electricidad están entre sí como las masas químicamente equivalentes.

Masas químicamente equivalentes son aquellas que son capaces de substituir la misma masa de hidrógeno. Si se elige a esta masa de hidrógeno, que sirve de comparación, 1,008 gr., que es su peso atómico, resulta que la masa equivalente de la plata es 107,88 gr., porque en el ácido nítrico HNO_3 , un átomo de hidrógeno es reemplazado por uno de plata. La masa equivalente del cobre en el $CuSO_4$ es 63,57:2=31,785 gramos, pues un átomo de cobre reemplaza a dos de Hidrógeno, lo que significa que su equivalencia es dos, y su peso atómico es 63,57. La masa equivalente del mismo cuerpo en el cloruro cúprico es 63,57, porque un átomo de cobre reemplaza a uno de H, lo que significa que su valencia es 1.

En suma la masa químicamente equivalente de un cuerpo es el cociente entre su peso atómico y su valencia.

Si indicamos con M_1 y M_2 las masas de cuerpos diferentes, libradas por iguales cantidades de electricidad, y \mathcal{M}_1 , \mathcal{M}_2 , \mathcal{M}_3 , \mathcal{M}_4 y \mathcal{M}_2 , las masas atómicas y las valencias respectivas, la ley de que nos ocupamos se formula así:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{M_1/\nu_1}{M_2/\nu_2}.$$
 [2]

5. Medición de la intensidad de una corriente mediante la electrólisis. Voltámetro de plata. — Internacionalmente se ha convenido en considerar como un Ampère a la intensidad de una corriente que pasando por una solución acuosa de nitrato de plata, deposita 0,00111800 gramos de plata por segundo.

En la fig. 226 está representado un modelo frecuente de voltámetro de plata destinado a la medición de intensidades por la electrólisis. El vaso inferior, que es de platino constituye el cátodo. El cilindro que está suspendido dentro, de plata purísima, es el ánodo. El electrólito se forma disolviendo de 15 a 20 partes de $AgNO_3$ en 100

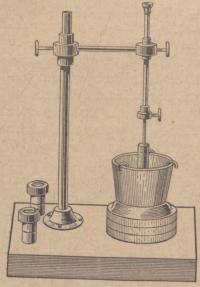


Fig. 226.

partes de agua destilada, completamente libre de cloro. El peso específico resulta de 1,12 a 1,26.

6. Teoría de la electrólisis. lones. — Ya dijimos que las moléculas del cuerpo disuelto (solución que constituye el electrólito), se disociaban en el acto mismo de la disolución. Esos componentes separados, que pueden ser átomos o grupos atómicos, y que están cargadas con cantidades iguales y de signos opuestos de electricidad reciben el nombre de iones.

Los iones positivos son arrastrados hacia el cátodo y los negativos hacia el ánodo.

No es difícil, además, hacer notorio, mediante las leyes de Faraday, lo que ratifican hechos que estudiaremos más adelante, que tanto la electricidad positiva como la negativa está compuesta por átomos, granos o cuantas. Los iones que provienen de elementos o radicales que en la combinación originaria tienen la valencia uno, aparecen con un cuanta elemental de electricidad, los que tienen la valencia dos con dos átomos de electricidad, los que tienen valencia tres, con tres átomos de electricidad y así siguiendo.

De acuerdo con eso, la disociación electrolítica del sulfato de cobre está representada de este modo:

$$CuSO_4 = \ddot{Cu} + \ddot{SO}_4;$$

la del nitrato del plata, disuelto en agua

$$AgNO_3 = \mathring{Ag} + \mathring{NO}_3.$$

7. Aplicaciones de la electrólisis. — Una de las aplicaciones más útiles de la electrólisis es la de recubrir piezas metálicas de capas de oro, plata, níquel, cromo, etc., y el de la reproducción de objetos.

Esos procesos constituyen lo que se llama la galvanoplastia.

El electrodo positivo, esto es el ánodo y la sal (o una de las sales) de la solución del electrólito debe ser del

mismo metal de que se desea recubrir el objeto, el cual se toma como el cátodo. Si el objeto es aislador se lo hace conductor frotán-

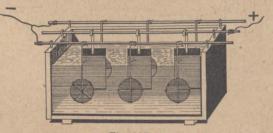


Fig. 227.

dolo con plombagina. Ya sabemos que, en definitiva, la masa metálica que se deposita sobre el objeto es igual a la masa que pierde el ánodo, el cual se adelgaza, a ojos vistas, con la continuación del proceso.

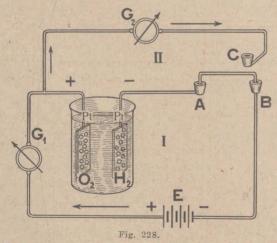
. En la fig. 227 está representada una cuba para galvanoplastia.

8. Polarización. — Ya hemos hecho referencias al fenómeno de la polarización al estudiar las pilas. Vimos, en-

tonces, que la corriente que engendra en un circuito un elemento voltaico disminuye con el tiempo a causa de que el hidrógeno que se pone en libertad recubre la lámina de cobre. Este electrodo se convierte poco a poco en un electrodo de aquel gas, cuyo potencial con respecto al líquido de la pila es menor que el de aquel metal.

Todo sucede como si al fluir la corriente por el circuito comenzase a actuar, en sentido opuesto a la de la pila, una fuerza electromotriz creciente. Esta fuerza se llama tensión de polarización.

Un experimento muy ilustrativo es el siguiente: si se envía una corriente eléctrica a través de una solución de



ácido sulfúrico contenida en un voltámetro a electrodos de platino (figura 228), si la tensión E que la produce es constante, su intensidad decrece con el tiempo a causa de que, en este caso, el electrodo positivo se recubre de oxí-

geno y el negativo de hidrógeno. Si en un instante dado se quita la llave de la posición AB y se la coloca en la AC queda abierto el circuito I e interrumpida, por lo tanto, la acción de la batería E, mientras que se cierra el II en el cual está intercalado el voltámetro en serie con el galvanómetro G_2 . La tensión de polarización del voltámetro origina una corriente eléctrica que hace desviar a G_2 en un sentido tal, que revela que el electrodo que en

la conexión anterior era el ánodo, es el polo positivo. Esa corriente se debilita hasta anularse porque ella nace a costa de la polarización existente, es decir, del recubrimiento de los electrodos por oxígeno e hidrógeno, respectivamente. Esa polarización o, lo que es lo mismo, ese recubrimiento disminuye con la corriente, desapareciendo totalmente cuando ha pasado cierta cantidad de electricidad.

9. Acumuladores. — En el número anterior se ha considerado un caso simple de polarización, puesto que ella provenía del recubrimiento de los electrodos con oxígeno e hidrógeno, respectivamente, pero está claro que el proceso puede consistir en una transformación química de aquéllos. Eso sucede en el plomo, p. ejem., como lo reveló primeramente R. Gastón Planté en el año 1860. El trabajo eléctrico se consume, pues, en la transformación química que se produce en el plomo. Esa transformación se realiza luego en sentido contrario produciendo trabajo eléctrico. En ese proceso se fundan los acumuladores.

El acumulador de plomo consiste, en su forma más simple, en dos placas de ese metal puestas paralelamente una frente de la otra en una solución de ácido sulfúrico diluído contenida en un recipiente de vidrio, ebonita o celuloide. Las placas se recubren, por lo común, de una capa de óxido del mismo metal. Si se hace pasar una corriente eléctrica a través del sistema se producen los siguientes cambios: en el ánodo el radical sulfato ataca al sulfato de plomo que ha formado el ácido sulfúrico con el óxido de aquel metal, formando peróxido de plomo, mientras que en el cátodo el sulfato es reducido a plomo metálico.

Cuando ha pasado cierta cantidad de electricidad, una de las placas, el cátodo, es de plomo metálico y la otra, el ánodo, está recubierta totalmente de una masa de peróxido de plomo, que tiene, por eso, un color habano oscuro. Si producido el proceso que terminamos de describir, se interrumpe la corriente y se unen las placas mediante

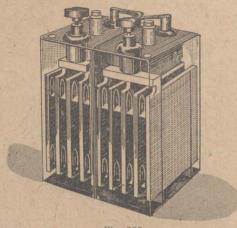


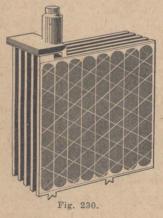
Fig. 229.

un conductor, fluye por éste una corriente eléctrica que tiene sentido opuesto a la corriente anterior. El polo positivo es el ánodo de antes, vale decir, la placa de color habano oscuro.

Por lo común, los acumuladores no están constituídos por un par de placas sino por varias. La cantidad de electricidad o,

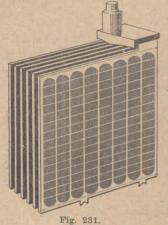
mejor dicho, de energía eléctrica que puede almacenarse en forma de energía química, es proporcional a la masa de plomo que es susceptible de entrar en combinación.

de plomo que es susceptible de Esa masa crece con el número de cargas y descargas. Se la aumenta mucho—lo que fué ideado por Faure—fundiendo placas de plomo con una verdadera red de celdillas que se llenan con una pasta formada con óxido de plomo y ácido sulfúrico. A la placa negativa se le da una gran superficie mediante caladuras profundas. La positiva se forma por el método de Faure tapando luego las celdillas con placas de



plomo perforadas, con lo cual la pasta queda fija en su sitio. En la fig. 229 está representado un acumulador transportable y en las 230 y 231, se ven dos juegos de placas: uno de positivas, las primeras, y otro de negativas.

En la fig. 232 están representados dos elementos de mucha capacidad de una gran batería. Puede allí apre-



ciarse de qué modo se hace el montaje. Se asegura la separación entre las placas colocando

entre ellas delgadas láminas de madera de una elaboración especial, de un espesor comprendido entre ½ y 1 mm. También se emplean láminas de ebonita perforadas.

El electrólito debe ser preparado con ácido sulfúrico purísimo y el agua en que se diluye bien desti-

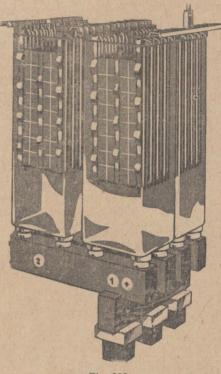


Fig. 232.

lado. Lo mejor es emplear el ácido y el agua que proveen las fábricas de acumuladores.

El peso específico de la solución debe estar comprendido entre 1,16 y 1,25 estando los elementos cargados. Sin carga de 0,03 a 0,05 menos. Durante la carga, primero la diferencia de potencial entre los bornes de un acumulador crece bruscamente y luego con lentitud hasta alcanzar la tensión de 2,4 Volt, aproximadamente. Luego crece rápidamente, otra vez, hasta 2,7 a 2,8 Volt. Este último salto se debe a la falta de material activo susceptible de ser transformado por la corriente. En este momento el desprendimiento de gases es intenso, constituyendo esto el mejor indicio de que ha adquirido su carga máxima normal.

La resistencia interior de un acumulador es muy pequeña.

Durante la descarga la tensión baja en seguida a dos Volt aproximadamente, tensión que se conserva constante durante un tiempo largo si la intensidad de la corriente no pasa de cierto valor. El acumulador debe considerarse descargado tan pronto como la tensión de los bornes es inferior en un 10 % a la tensión normal.

La capacidad de un acumulador se expresa en Ampère - horas, siendo 1 Ampèr - hora 3.600 Coulomb.

CAPITULO XIV

EL CAMPO MAGNÉTICO DE LA CORRIENTE ELECTRICA

APLICACIONES

1. Campo magnético de una corriente rectilínea. — I. Forma de las líneas de fuerza. — Ya hemos visto que al hacer fluir una corriente eléctrica por un conductor rectilíneo, una aguja imantada colocada en su cercanía se desvía en un sentido si está debajo del mismo y en sentido opuesto si está arriba. Este hecho revela que la corriente eléctrica crea en el espacio en que se encuentra un campo magnético, el cual se hace notorio por el experimento de

la fig. 233. Un conductor cilíndrico, rectilíneo, pasa normalmente a través de una pantalla sobre la cual se han desparramamado limaduras de hierro, las cuales se distribuyen en la for-

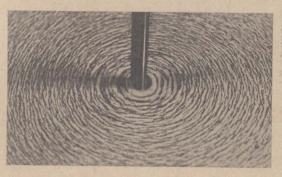
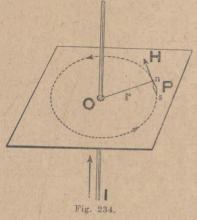


Fig. 233.

ma que indica la figura, tan pronto como fluye por aquel una corriente eléctrica de cierta intensidad.

Las líneas de fuerza de una corriente rectilínea son, pues, circulos de centro en el conductor.

El sentido de esas líneas queda definido por la siguiente regla de Maxwell: El sentido de la fuerza H (fig. 234), que actúa sobre un polo Norte es aquel en que gira un tira-



buzón que progresa en el sentido de la corriente.

II. LA LEY DE BIOT Y SA-VART. — Si en el punto P se encuentra la unidad de masa magnética Norte, la fuerza H es la intensidad del campo magnético de la corriente en el punto P. De cuidadosas mediciones dedujeron Biot y Savart que la intensidad del campo magnético H en un punto P (fig.

234), es proporcional a la intensidad de la corriente I e inversamente proporcional a la distancia r que separa al punto del conductor rectilíneo. La fuerza es, por otra parte, normal al plano que forman el conductor y el segmento de recta que constituye aquella distancia.

Es decir que se tiene

$$H = C \frac{I}{r},$$
 [1]

donde C es la constante de proporcionalidad. Para simplificar las leyes que de la [1] se derivan, se escribe C=2, con lo que resulta

$$H = \frac{2I}{r}$$
 [2]

Esa elección de C, a la que se tiene derecho, sólo influye en la unidad de intensidad que definen estos fenómenos, asunto sobre el cual volveremos.

2. Campo magnético de una corriente circular. — En la fig. 235 se tiene una representación del campo magnético de

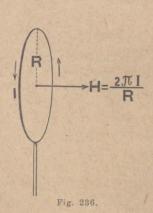
una corriente circular. Un aro pasa perpendicularmente por una pantalla de papel tendido en un marco, Limaduras de hierro desparramadas sobre la pantalla se distribuven v orientan en la forma que



Fig. 235.

enseña la figura, tan pronto como fluye por el aro una corriente de cierta intensidad.

En el centro del círculo la intensidad H del campo magnético (fig. 236) está dada por la expresión

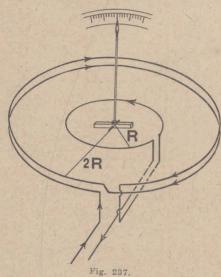


$$H = \frac{2\pi I}{R},$$
 [3]

donde I es la intensidad de la corriente y R el radio de aquél.

La [3] que es un resultado que se deduce, en realidad, matemàticamente de la [1], se puede comprobar experimentalmente, doblando un mismo conductor (fig. 237), de suerte de formar con él tres círculos situados en el mismo plano y concéntricos: uno de radio $R_1 = R$

y los otros dos, de igual radio, $R_2 = 2R$, puesto uno al lado del otro y suspendiendo una pequeña aguja imantada en el centro común de los círculos. Si la misma corriente circula por los tres conductores así formados, de suerte que en el círculo de radio R el sentido sea opuesto al de los otros dos, no se advierte desviación alguna del imán



suspendido, como lo requiere la [3], pues la acción de los dos círculos externos equivale a la de una corriente doble y como el radio es el doble también, el efecto es igual al del otro círculo.

3. La unidad electromagnética de intensidad de corriente o Weber y el Ampère. — Las expresiones [2] y [3], más cómodamente esta última, definen la unidad de in-

tensidad de corriente del sistema electromagnético, unidad que recibe el nombre de Weber. La [2] es, como hemos dicho, un resultado experimental concerniente a un fenómeno electromagnético, en cuya obtención se ha procedido con entera independencia de la definición del Coulomb y del Ampère.

De acuerdo con la expresión

$$H = \frac{2\pi I}{R}$$

una corriente tiene la unidad electromagnética de intensidad, esto es un Weber, si la intensidad del campo magnético que crea fluyendo por un conductor lineal circular de un centímetro de radio tiene en el centro de éste un valor de 2π Gauss, de modo que la contribución de cada centímetro de la corriente a la formación de esa intensidad es de un Gauss.

Por lo que hemos dicho más arriba, la relación entre el *Weber* y el *Ampère* debe determinarse experimentalmente. Esas determinaciones, que han sido numerosísimas, y sobre las cuales no podemos explayarnos aquí, revelan que

1 Weber = 10 Amp.

4. Campo magnético de un solenoide. — La fig. 238 enseña claramente la forma del campo magnético de un solenoide. En el interior de éste las líneas de fuerza son paralelas

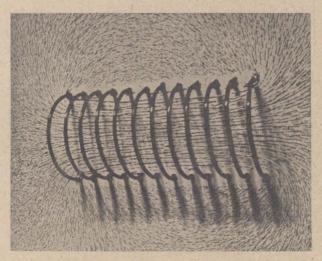
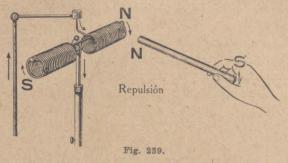


Fig. 238.

entre sí y al eje de aquél y se cierran por fuera como las líneas de un imán.

Un solenoide se comporta, precisamente, como una barra imantada. Uno de sus extremos, aquel por el cual la corriente fluye por las espiras en sentido opuesto al de giración de las manecillas de un reloj, se comporta



como si fuese un polo norte y el otro como si fuese un polo sur. Estos hechos pueden ponerse en evidencia con el experimento que enseña la

fig. 239. Si las espiras del solenoide están próximas y si éste es suficientemente largo, en su interior, en la región media, la intensidad del campo magnético está dada por la expresión

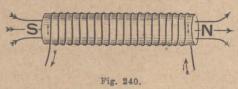
$$H = \frac{0.4 \pi nI}{I},$$

donde I es la intensidad de la corriente expresada en Ampères, n el número de espiras y l la longitud del solenoide.

5. El electroimán. — Si sobre una barra de hierro se arrolla un solenoide (fig. 240), es decir, si se forma una bobina, al pasar una corriente eléctrica por ésta, la barra se imanta, ofreciendo polos de mucho mayor poder que los

que corresponden al solenoide solamente.

El fenómeno es complicado. En general, la intensidad del campo magnético en



el interior del hierro, que es la que produce la imantación de éste, es menor que la intensidad del campo de la corriente. La imantación debe estar, pues, medida por otra magnitud física diferente que la intensidad del campo H. Esa magnitud se llama inducción magnética y se la representa con la letra B. Por otra parte, la inducción B es proporcional a la intensidad del campo H pudiéndose escribir

$$B = \mu H$$
,

donde μ (letra griega mi), es la constante de proporcionalidad que se designa con el nombre de permeabilidad magnética.

En los cuerpos ferromagnéticos, como el hierro, el níquel

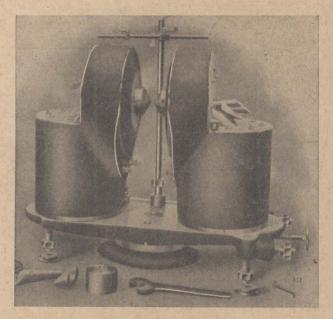
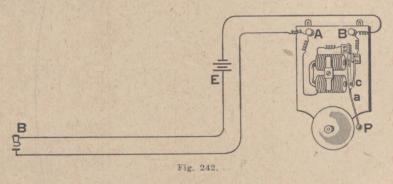


Fig. 241.

y el cobalto, μ es muchísimo mayor que la unidad y varía con H; en los cuerpos paramagnéticos es constante y un poco mayor que la unidad, y en los diamagnéticos, menor que la unidad.

El electroimán en forma de barra no es, quizás, el más frecuente. Para obtener campos muy intensos entre sus polos, las bobinas se arrollan sobre núcleos de hierro casi cerrados de modo que los polos queden muy próximos. En la fig. 241 está representado un poderoso electroimán de du Bois. El gran modelo construído por la casa Hartmann y Braun y cuyo peso es de 450 kg., da, en buenas condiciones de funcionamiento, un campo de 55.000 Gauss. Se han construído en época reciente, electroimanes aun más poderosos.

6. Campanilla eléctrica. — En la fig. 242 se ha representado una instalación simple de campanilla eléctrica. Al hacer presión en el botón *B* se cierra el circuito de la

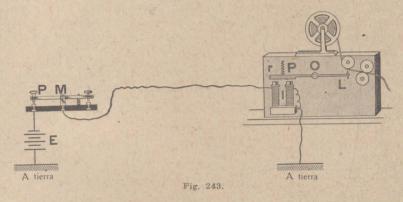


batería de pilas E. La corriente eléctrica pasa por el electroimán y los polos de éste atraen bruscamente a la varilla a, cuyo extremo esférico P choca en la campanilla, haciéndola sonar. Al acercarse la varilla a al electroimán, se separa del contacto c abriendo el circuito, con lo que el núcleo de hierro dulce de aquél se desimanta. La varilla a vuelve así, por su elasticidad, a la posición inicial, cerrando nuevamente el circuito, recomenzándose, en seguida, el mismo proceso. De este modo la campanilla es golpeada periódicamente por P.

7. El telégrafo. — La corriente eléctrica hace posible, de modo admirable, la transmisión de señales a la distancia. En el año 1833 Gauss y Weber transmitieron eléctricamente señales en la ciudad de Gottingen, entre la Universidad y el Observatorio. Una aguja magnética era desviada hacia la derecha o hacia la izquierda, según el sentido en que se enviaba la corriente.

En el año 1837 el americano Morse ideó el telégrafo que lleva su nombre, que pasamos a describir.

Al oprimir en el extremo P del "manipulador" M (fig. 243), de la estación transmisora, se cierra el circuito



de la batería E, y fluye una corriente eléctrica por la línea en la cual se encuentra la bobina del electroimán I, cuyo núcleo es de hierro dulce. Uno de los polos de éste atrae el extremo, que lleva un trocito de aquel mismo metal, de una palanca P que puede girar alrededor de un eje O.

El otro extremo de ésta lleva un lápiz L que se apoya sobre una cintilla de papel que se desplaza entre rodillos accionados por un mecanismo de relojería.

Tan pronto como cesa la presión en el manipulador, cesa la corriente y la acción del electroimán y también el contacto entre el lápiz y la cinta de papel porque un resorte r levanta la palanca.

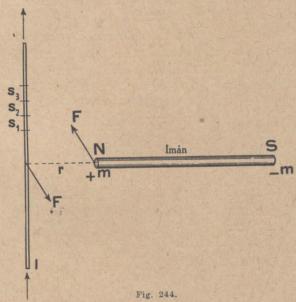
Si el cierre del circuito que engendra la presión del dedo en el manipulador es muy corto, el lápiz señala un punto en la cintilla antes citada y si es más largo, una rayita.

Mediante puntos y rayas puede inscribirse en el papel un mensaje cualquiera que se transmite desde el sitio en que el manipulador se encuentra, pues basta, como lo hizo Morse, asignar a cada letra del alfabeto, una combinación de puntos y rayas.

CAPITULO XV

LAS FUERZAS PONDEROMOTRICES

1. Acción de un campo magnético sobre una corriente. — Ya hemos visto que una corriente lineal (fig. 244), crea



un campo magnético de intensidad

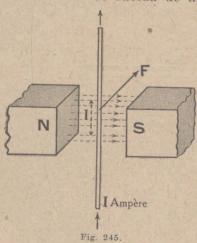
$$H = \frac{0.2 I}{r}$$

si I está dado en Ampère. Ésa es la fuerza que actúa sobre

la unidad de masa magnética situada a la distancia r. Si la masa es m, la fuerza es m veces mayor, es decir, F = mH. Por otra parte la intensidad H del campo en el lugar en que se encuentra m es la superposición de los campos elementales provenientes de todos los elementos s_1 , s_2 , s_3 , etc., en que puede descomponerse la corriente.

De acuerdo con el principio de la igualdad de la acción y de la reacción, el campo magnético del polo de masa m aplica sobre el conductor una fuerza F igual y de sentido contrario. Ese campo aplica fuerzas elementales sobre cada uno de los elementos s_1 , s_2 , s_3 , etc., de corriente, siendo F la resultante de las mismas.

Es fácil demostrar, partiendo de lo que terminamos de exponer, que si un conductor por el cual fluye una corriente de intensidad *I* (fig. 245), cruza normalmente a las líneas de fuerza de un campo magnético uniforme



de intensidad H y es l la porción del mismo adentrada en éste, la fuerza F que se aplica sobre ese trozo es

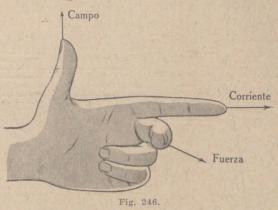
$$F = \frac{HII}{10}$$
 dinas,

si H se expresa en Gauss, I en Ampère y l en centimetros.

El sentido de la acción de la fuerza se deduce fácilmente tomando en cuenta que es el opuesto al de la

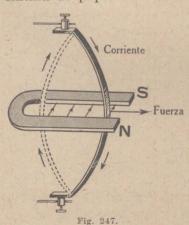
fuerza que el campo de la corriente aplica al polo Norte, p. ejem., y que el sentido de ésta está dado por la regla del tirabuzón. Para recordarlo, Flemming ha ideado una regla que se conoce con el nombre de regla de la mano izquierda. Si se sitúan los dedos pulgar, índice y medio de esa mano formando ángulos rectos entre sí, dos a dos

(fig. 246), si el primero y el segundo indican la dirección y sentido del campo y de la corriente, respectivamente, el dedo mayor señala la dirección y sentido de la fuerza y, por lo tanto del movimiento, si



el conductor está libre de moverse.

2. Experimentos de curso. La rueda de Barlow. — Una cintilla de papel de estaño (fig. 247), que pasa por entre

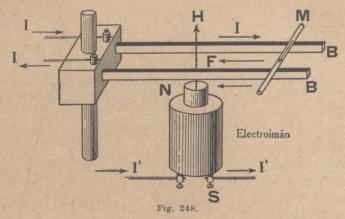


los polos de un imán de herradura toma las posiciones que se indican en el dibujo cuando fluye una corriente eléctrica por ella. Si la posición del imán es invariable, el sentido de la fuerza ponderomotriz F cambia con el sentido de la corriente.

La instalación representada esquemáticamente en la fig. 248, permite realizar, de modo más interesante, análoga experiencia. Si el campo

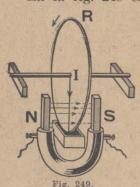
magnético y la corriente tienen los sentidos indicados en la figura, el cilindro móvil M se mueve sobre las barras

horizontales B, B en el sentido de la flecha F. Cambiando ya sea el sentido de la corriente I que fluye por M o el de la I' que alimenta el electroimán, el movimiento se cum-



ple en sentido opuesto al que señala F. Cambiando los sentidos de ambas corrientes a la vez, el sentido de la fuerza F se conserva.

En la fig. 249 está representada esquemáticamente la



rueda de Barlow. Un disco de cobre R, que puede girar con entera facilidad alrededor de un eje horizontal, y cuyo borde inferior se adentra en el mercurio de un baño, está situado entre los polos de un electroimán, de suerte que las líneas de fuerza de éste son normales a su plano.

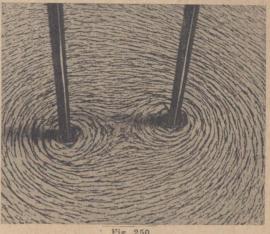
La corriente eléctrica sigue los radios que van del centro del disco a los puntos que están sumergidos en

el mercurio. Si los sentidos del campo y de la corriente son los indicados en la figura, la rueda gira en el sentido que señalan las flechas.

3. Acciones entre las corrientes. — La experiencia enseña que entre conductores por los cuales fluyen corrientes

eléctricas se manifiestan fuerzas en forma de tensiones o desplazamientos, las cuales, por su origen, se denominan fuerzas electrodinámicas.

Esas acciones que son, está claro, reciprocas, iguales v opuestas, como lo exige el tercer prin-



cipio de la mecánica, se explican, sin más, teniendo presente que cada uno de los conductores se encuentra en el



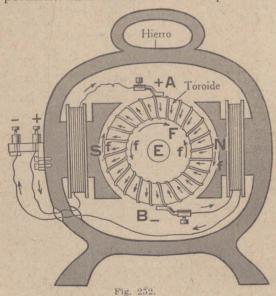
campo magnético del otro, además de encontrarse en el suyo propio.

Así, p. ejem., dos hilos paralelos por los cuales circulan corrientes en el mismo sentido se atraen, mientras que se repelen cuando los senti-

dos de las corrientes son opuestos. Estos fenómenos pueden observarse teniendo a pequeña distancia uno del otro dos hilos delgados de cobre de unos cincuenta centímetros de longitud.

Las figs. 250 y 251, representan la distribución de las líneas de fuerza de ambos casos. Cuando las corrientes son del mismo sentido, las líneas del campo resultante aparecen como si las propias de cada conductor se hubiesen extendido para acercarse a las del otro o para formar con ellas líneas que abracen a los dos conductores a la vez. En el caso de corrientes de sentidos opuestos acaece lo contrario: las líneas de cada conductor aparecen como si se comprimiesen para alejarse de las del otro.

4. El motor eléctrico. — Las fuerzas ponderomotrices permiten la construcción de dispositivos que entregan tra-



bajo mecánico gastando trabajo eléctrico. Esos dispositivos se llaman motores eléctricos. Daremos, desde luego, como corresponde a la naturaleza de esta obra, solamente una idea de su funcionamiento.

En la fig. 252 está representado un motor a anillo de Gramme. Un toroide

de hilos de hierro, que lleva un arrollamiento o bobina cerrado sobre sí mismo, capaz de girar en torno a un eje E, se encuentra entre los polos de un electroimán, es decir,

en el entrehierro, como se dice. Ese electroimán es alimentado por la misma corriente eléctrica que fluye por las

espiras. La corriente llega a éstas o sale de ellas a través de dos contactos A v B que se Cintilla llaman escobillas. En todas las de Bronce Fosforado E N Fig. 253. espiras situadas entre A v B, a la izquierda, el sentido de la corriente es el mismo. Igual cosa acaece en las de la derecha, pero en éstas, el sentido es opuesto al de las anteriores. Como esas corrientes

nético del electroimán, se manifiestan fuerzas ponderomotrices f que se han representado en una espira de la

están en el campo mag-

Fig. 254.

derecha y en una de la izquierda. Esas fuerzas determinan un momento rotatorio que hace girar al toroide continuamente en el sentido de la flecha F.

5. Principio de los galvanómetros. — Los fenómenos que terminamos de explicar se aplican en la construcción de aparatos que indican el pasaje de la corriente y permiten su medida. Veamos cual es la construcción y el funcionamiento de los mismos.

Supongamos (fig. 253), que se tiene un conductor de forma rectangular situado en el campo magnético de un

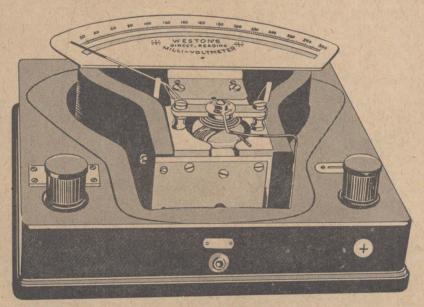


Fig. 255.

imán permanente y que es capaz de girar en torno de un eje vertical sostenido en pivotes o de un delgado hilo del cual está suspendido, como en el caso de la figura. Si fluye una corriente por el conductor rectangular, sobre los hilos laterales del conductor obran fuerzas ponderomotrices F, F de sentidos opuestos, haciéndolo girar. Si el conductor rectangular en lugar de estar constituído por una sola vuelta, está formado por muchas, en cuyo caso es una bobina, que se denomina, también, cuadro móvil, las fuerzas y por lo tanto las cuplas son mayores.

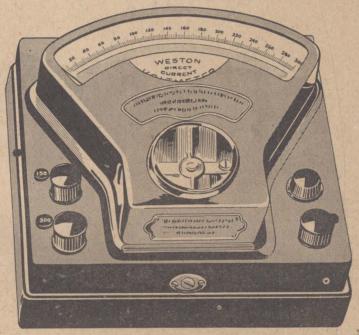


Fig. 256.

En los galvanómetros muy sensibles la bobina pende de una delgadísima cintilla de bronce fosforado, material que no conserva residuo de deformación elástica, de modo que la suspensión recobra su posición inicial o *cero* una vez que cesa el pasaje de la corriente. Sobre la bobina o debajo de ésta se encuentra un pequeño espejuelo plano *E*, que permite observar las desviaciones haciendo reflejar sobre el mismo un rayo de luz.

En la fig. 254 se tiene un galvanómetro de Siemens, que permite develar corrientes de una intensidad de 10-9 Ampère y diferencias de potencial de 10-7 Volt. A la izquierda puede verse la bobina o cuadro móvil. El imán permanente es la herradura y está colocado con sus ramas verticales.

En las figs. 255 y 256 puede verse un Volt Amperímetro de Weston que se funda en el mismo principio. El imán de herradura, que es bien visible, está colocado horizontalmente. La bobina gira en torno a dos pivotes y lleva una aguja que indica la desviación sobre una escala. Un espiral elástico equilibra la acción del par de las fuerzas ponderomotrices.

CAPITULO XVI

LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

1. Los hechos fundamentales. — I. Generalidades. — Ya hemos visto que cargas eléctricas en movimiento engendran un campo magnético; toda corriente eléctrica va acompañada de un campo de esa naturaleza. Recíproca-

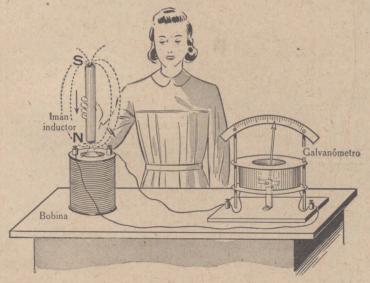


Fig. 257.

mente, el movimiento de masas magnéticas o, lo que es más propio y general, el movimiento de un campo magnético o su aparición o desaparición relativamente a un conductor, origina en éste una corriente eléctrica. Este hecho puede ponerse de manifiesto en diversos experimentos

II. INDUCCIÓN POR MOVIMIENTO DE IMANES PERMANENTES. - Si se introduce una barra imantada (fig. 257) en el interior de una bobina que, unida a un galvanómetro, constituye un circuito cerrado, o se retira de ella, aquél acusa el pasaje de una corriente que dura lo que dura el movimiento del imán. El sentido de la desviación de la aguja del galvanómetro v, por lo tanto, de la corriente,



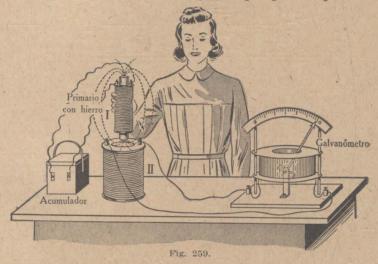
es uno si el polo Norte es el que se acerca y el opuesto si es el polo Sur. El sentido de la corriente que engendra el alejamiento de un polo es opuesto al de la corriente que produce su acercamiento.

III. INDUCCIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE UN CONDUCTOR POR EL CUAL FLUYE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA. — Análogo experimento al anterior puede realizarse substituyendo el imán por una bobina por la cual fluve una corriente eléctrica,

la cual se comporta como un imán (fig. 258). En sus caras extremas aparecen los polos: el polo Norte en la cara por donde la corriente circula en sentido opuesto al de giración de las manecillas de un reloj y el polo Sur en la restante.

Si la bobina lleva dentro un núcleo de hierro (fig. 259), la corriente inducida es de mucha mayor intensidad, porque los polos son más poderosos.

Al tratar el electroimán, dijimos que para explicar los



fenómenos que en él se producían, era menester introducir, además del vector H, que representa la intensidad del campo magnético, el vector inducción magnética B, que está ligado al anterior por la expresión

$$B = \mu H$$
,

donde μ es una constante que en los cuerpos ferromagnéticos es mucho mayor que la unidad variando con H.

IV. INDUCCIÓN POR DESAPARICIÓN, APARICIÓN, AUMENTO O DISMINUCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO. — Si encontrándose las

dos bobinas en reposo relativo, en la posición que enseña la fig. 260 y 260 a, se advierte que, en el preciso momento en que se hace circular por la bobina inductora

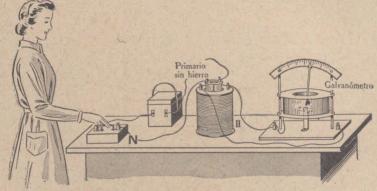
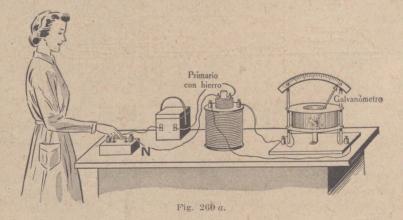


Fig. 260.

una corriente eléctrica, se induce una corriente eléctrica en la otra bobina, que dura un brevísimo instante, y que



lo mismo sucede en el momento en que se interrumpe la corriente que fluye por la bobina primaria, siendo el sentido de la corriente inducida opuesto al anterior.

Lo mismo ocurre si se aumenta o disminuye la intensidad de la corriente que circula por el primario, lo que produce un aumento o una disminución de la intensidad del campo magnético de que va acompañada.

V. Inducción por desplazamiento del conductor o parte del mismo en el campo magnético. — En la instalación de la fig. 261, las líneas de fuerza de un electroimán pasan a través de la superficie que limitan el cilindro metálico



Fig. 261.

móvil AB y dos barras metálicas K y L situadas horizontalmente y paralelas entre sí, cuyos extremos, de un lado, están unidos a un galvanómetro.

Si se desplaza el cilindro AB sobre las barras K y L en el sentido de la flecha S se advierte que por el galvanómetro fluye una corriente que dura lo que dura el desplazamiento de aquel conductor.

Lo mismo acaece si se mueve AB en sentido opuesto, siendo opuesto, también, al anterior, el sentido de la desviación de la aguja del galvanómetro y, por consiguiente, el de la corriente inducida.

Observemos que al desplazar el conductor cilíndrico AB sobre las barras K y L disminuye o aumenta el área de la superficie que limitan, con lo que disminuye o aumenta el número de líneas de fuerza que pasa a su través. El conductor AB corta las líneas de fuerza en su movimiento.

2. La ley de la inducción electromagnética de Faraday. — I. Definición de flujo. — Supongamos (fig. 262), que las

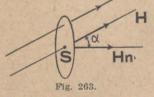


líneas de fuerza de un campo magnético homogéneo, es decir, que tiene en todas partes la misma dirección e igual intensidad cruza normalmente el área S que limita un conductor. Se

llama flujo de fuerza a través de S y se representa con la letra griega mayúscula Φ (fi) al producto de H por S. Es, pues,

$$\Phi = HS$$
.

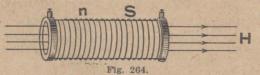
Si las líneas no cortan a S normalmente (fig. 263, el flujo es el producto de S por la componente de H normal a la misma, que es



 $H_n = H \cos \alpha$. El flujo en este caso es, por lo tanto,

$$\Phi = H_n S = H \cdot \cos \alpha S.$$

Si es un solenoide o bobina de n espiras cada una de



las cuales tiene el área S (fig. 264),
H las que son cortadas normalmente por las líneas de un

campo H, el flujo de fuerza está dado por la expresión

La unidad de flujo es el flujo a través de una superficie de 1 cm.² situada normalmente a las líneas de fuerza de un campo magnético homogéneo de un Gauss de intensidad. Esa unidad se llama *Maxwell*.

Ya se ha dicho, y es oportuno repetirlo ahora, que los fenómenos electromagnéticos no pueden explicarse con la sola magnitud física intensidad del campo, que es el vector H. Si en un solenoide por el cual circula una corriente se introduce un núcleo de hierro, sus polos se hacen más intensos; las corrientes inducidas en una bobina son mucho más intensas cuando se acerca a ella una bobina por la cual fluye una corriente eléctrica y que lleva un núcleo de hierro, que cuando carece de él.

Para explicar aquellos fenómenos es menester la introducción de otra magnitud física, la inducción magnética, que hemos representado ya con la letra B, siendo

$$B = \mu H$$
,

donde μ es una constante. En los materiales ferromagnéticos μ depende de H y tiene valores muy superiores a la unidad. En cierta clase de acero, p. ejem., para un campo de intensidad H=0.25 Gauss es $\mu=960$ y, por lo tanto, B=240; para H=1.5 Gauss, $\mu=4.030$ y B=6.050 y para H=100 Gauss, $\mu=180$ y B=17.980. La constante μ crece, pues, con la intensidad del campo, adquiere un valor máximo y luego decrece.

En el aire es $\mu=1$ y en todos los cuerpos paramagnéticos un poco mayor que la unidad. En el aire, como en el vacío o, lo que es lo mismo, en el éter, H y B son iguales.

Si el vector inducción corta normalmente un área S, se llama flujo de inducción al producto BS. Es decir, que

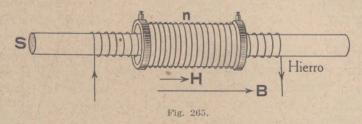
$$\Phi = BS$$
.

En el caso de la fig. 265, se tiene una barra de hierro en la cual un campo de intensidad H que proviene de una

corriente, ha producido una inducción B. El flujo de inducción a través de la bobina exterior de n espiras es

$$\Phi = nSB$$
,

donde S es el área de la sección de la barra de hierro, pues



ésa es la parte del área de una espira de aquella bobina a través de la cual pasa la inducción B.

II. La LEY DE FARADAY. — En diversas oportunidades hemos dicho que el movimiento de la electricidad se produce, únicamente, si obran fuerzas eléctricas. Los experimentos de los apartados II, III, IV y V del número 1 de este capítulo enseñan, por lo tanto, que por inducción se engendran fuerzas eléctricas en los conductores que constituyen un circuito cerrado conjuntamente con el galvanómetro. Esos conductores son, pues, el asiento de un campo eléctrico cuyas líneas de fuerza, que van por el interior de los mismos, son cerradas puesto que es cerrado el circuito que ellos constituyen.

El trabajo que gastan las fuerzas eléctricas de ese campo si la unidad de carga eléctrica da una vuelta en el circuito bajo la acción de las mismas, es *la fuerza* electromotriz inducida.

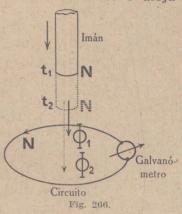
Los experimentos antes descriptos condujeron a Faraday a la ley que lleva su nombre, la cual dice: la fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual a la variación

en el tiempo del flujo de inducción a través del área que el mismo limita.

Cuanto más rápidamente varía el flujo de inducción tanto mayor es la fuerza electromotriz y, por lo tanto, la intensidad de la corriente inducida. Esto puede comprobarse aumentando la rapidez del acercamiento o aleja-

miento del imán o de la bobina de los experimentos de los apartados II y III del número 1.

Supongamos, p. ejem., que en la instalación de la fig. 266, el flujo de inducción a través del circuito en el instante t_1 es Φ_1 y que por movimiento del imán que lo produce en el instante t_2 , que difiere muy poco de t_1 , el flujo es Φ_2 . El flujo ha variado, pues, en el importe $\Phi_2 - \Phi_1$ en el lapso



 t_2-t_1 . Se llama variación del flujo de inducción en el tiempo al cociente $(\Phi_2-\Phi_1):(t_2-t_1)$.

Si representamos con E_i a la fuerza electromotriz inducida, esa fuerza, durante el intervalo de tiempo comprendido entre t_1 y t_2 , está dada, de acuerdo con la ley de Faraday, por la expresión

$$E_i = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1}.$$

El signo menos se debe al hecho de que si elegimos como sentido positivo de circulación en el circuito el de las saetas de un reloj, un incremento de flujo engendra una fuerza electromotriz y, por consiguiente, una corriente de sentido negativo, vale decir, opuesto al de giración de las manecillas del reloj.

Si Φ_2 y Φ_1 están dados en Maxwell y t_2 y t_1 en segundos para que E_i esté dado en Volt, debe escribirse

$$E_i = - rac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1}$$
 . 10-8 Volt.

3. La regla de Lenz. — Al efectuar el experimento de la fig. 261, p. ejem., cualquiera sea el sentido del desplazamiento del conductor cilíndrico AB sobre las barras K y L, hay que vencer una fuerza resistente. Cuando se lo mueve en el sentido de la flecha S, la fuerza resistente tiene el sentido de la flecha punteada F. Esta fuerza no es sino la fuerza ponderomotriz que obra entre el campo magnético y la corriente inducida.

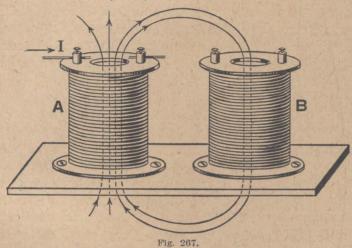
La regla de Lenz, dice precisamente, que la corriente inducida tiene un sentido tal, que con sus propios fenómenos de inducción o con la fuerza ponderomotriz con que reacciona sobre el campo magnético, se opone a la causa que la produce. La causa que la produce es el desplazamiento del conductor AB y la fuerza F obra en sentido opuesto al mismo. (Véase el número 5 para comprender el sentido de las palabras "con sus propios fenómenos de inducción".

Esa regla fluye del principio de conservación de la energía. La fuerza electromotriz inducida gasta trabajo en la corriente que engendra y ese trabajo no es sino el equivalente del trabajo que hay que gastar en mover el conductor AB en contra de la fuerza ponderomotriz F. Si así no fuese se produciría trabajo sin consumir nada, lo que es imposible.

A eso mismo se debe que en el caso de la fig. 266 la corriente inducida tenga el sentido opuesto al de giración de las agujas de un reloj, pues así la cara de arriba se comporta como un polo norte y el trabajo de la fuerza electromotriz inducida es el equivalente del trabajo que

se gasta en acercar el polo norte del imán al circuito venciendo la fuerza repulsiva del polo norte inducido.

4. Inducción mutua. — Supongamos que se tienen dos circuitos geométricamente invariables y relativamente fijos, dos bobinas A y B, p. ejem., una frente a la otra (fig.



267). Si en una de ellas circula una corriente de intensidad *I*, se tendrá un campo magnético y cierto número de sus líneas pasarán a través de la superficie que la otra bobina limita. Es decir, que por obra de la corriente que fluye por una de las bobinas pasa a través de la otra cierto flujo de inducción que proviene de líneas del campo magnético de aquella que "abrazan" a los dos circuitos.

La teoría enseña que ese flujo de inducción, que representaremos, lo mismo que antes, con la letra griega mayúscula Φ (fi) está dado por la expresión

$$\Phi = MI$$
,

donde I es la intensidad de la corriente dada en Weber (1 Weber = 10 Ampère), y M una constante llamada coe-

ficiente de inducción mutua, que depende, exclusivamente, de la configuración geométrica de los conductores.

Si varía la intensidad de la corriente que fluye por una de las bobinas, que llamaremos circuito primario o primario, simplemente, varía el flujo de inducción a través de la otra bobina o secundario en el cual se produce, por esto, una fuerza electromotriz inducida. Si una corriente de un Weber, es decir de 10 Ampère que fluye por el primario crea un flujo de un Maxwell a través del secundario, el coeficiente de inducción mutua es la unidad, unidad que se llama Henry.

5. Autoinducción. Sus fenómenos. — Si una corriente de intensidad I fluye por un circuito cualquiera, que supondremos rígido, crea un campo magnético cuyas líneas, que son siempre cerradas, "abrazan" al conductor. La corriente produce, pues, un flujo de inducción a través de la superficie que limita el mismo conductor por el cual circula, por lo que se lo llama flujo de autoinducción. La teoría enseña que ese flujo está dado por la expresión

$\Phi = LI$,

donde L es una constante, llamada coeficiente de autoinducción, que depende, exclusivamente, de la configuración geométrica del circuito. Esa constante es la unidad, que se llama Henry, si siendo I un Weber es Φ un Maxwell.

Está claro que si varía *I* se produce una variación de flujo, originándose *en el propio circuito* una fuerza electromotriz que se denomina de *autoinducción*.

Las fuerzas electromotrices, o la consecuencia de las mismas, las corrientes de autoinducción, pueden ponerse fácilmente de manifiesto, mediante experimentos que se explican a continuación ideados por Faraday.

Si se conecta en derivación de una autoinducción, de un electroimán, p. ejem. (fig. 268), una lamparilla eléctrica y se hace circular una corriente tal que apenas enrojezca su filamento al retirar la llave C, abriendo así el

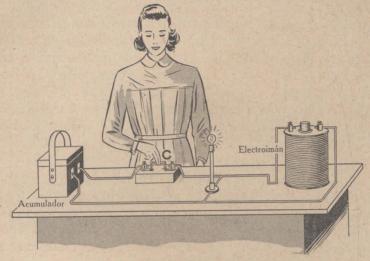
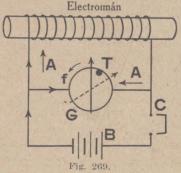


Fig. 268.

circuito, la lamparilla brilla intensamente un momento, por obra de la corriente que se induce al desaparecer el campo magnético y, por lo tanto, la inducción en el hierro del electroimán.

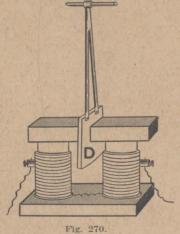
Ese mismo experimento puede efectuarse substituyendo la lámpara con un galvanóscopo *G* (fig. 269), lo cual hace posible, una vez más, la comprobación de la regla de Lenz. Supongamos que la corriente eléctrica proveniente de la batería *B* desvía la aguja del galvanóscopo



hacia la derecha, hasta una posición como la que indica la flecha de puntos. Se la vuelve a cero y se la mantiene en tal posición mediante un tope T, que sólo hace posible su movimiento hacia la izquierda.

Si se abre luego la llave *C*, la aguja del galvanóscopo se desvía en el sentido últimamente nombrado, esto es, en el que indica la flecha *f*, lo cual prueba, ya que está interrumpido el circuito inferior donde está la llave, que la corriente inducida tiene el sentido que indican las flechas *A*, de suerte que el sentido de la corriente de autoinducción es igual que el de la corriente proveniente de la batería, como era de esperar, pues ella debe oponerse a la causa que la produce y esa causa es la disminución de la corriente.

6. Las corrientes de Foucault. — En todos los lugares de una masa metálica cualquiera donde varíe un flujo de



inducción se producen corrientes inducidas, que son cerradas. Esas corrientes que se consumen produciendo calor en la masa metálica, por efecto Joule se denominan corrientes de Foucault. Obedecen, por su-

puesto, a la ley de Lenz, lo que se comprueba fácilmente haciendo oscilar un disco grueso de cobre, D, entre los polos

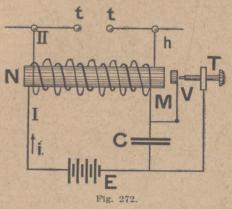


de un electroimán (fig. 270). Si éste no ha sido excitado, las oscilaciones duran, amortiguándose lentamente. En cambio, si se

hace fluir una corriente de varios Ampére por las espiras de aquél, el disco de cobre se detiene bruscamente al penetrar al espacio comprendido entre los polos. Las corrientes de Foucault disminuyen muchísimo evitando la continuidad de la masa metálica, lo cual puede ponerse de manifiesto repitiendo la experiencia del disco oscilante, substituyendo a éste por otro de idéntico contorno exterior pero provisto de cortes (fig. 271). El péndulo que así se forma, puesto en movimiento, no es detenido en el primer pasaje entre los polos. Las corrientes de que nos ocupamos se aprovechan para amortiguar las oscilaciones de las agujas imantadas de las brújulas, de los galvanómetros a imán, etc.

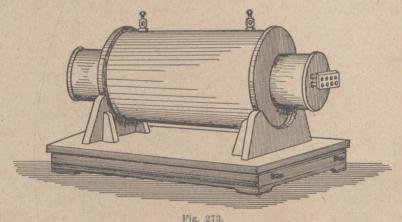
7. Bobina o inductor de Ruhmkorff. — Este inductor consiste en dos arrollamientos o bobinas coaxiales (fig. 272), el interior, que lleva el número I, de pocas vueltas de hilo grueso y el otro, II, de gran número de vueltas de un hilo delgado. Interrumpiendo en la bobina interior o circuito primario una corriente de baja tensión, se origina

en el secundario, por inducción, una tensión elevada que permite producir entre sus terminales t, t, chispas de gran longitud. A fin de incrementar el flujo de inducción y, por lo tanto, su variación al abrir y cerrar el circuito I, la bobina que constituye a éste está envuelta en un núcleo de hilos de



hierro dulce, aislados entre sí, con el objeto de disminuir las corrientes de Foucault.

Las fuerzas electromotrices de autoinducción que se producen en el circuito primario se oponen, de acuerdo con la ley de Lenz, a la variación que la produce, vale decir, a la rápida extinción de la corriente y por lo tanto del flujo. Esto hace disminuir la fuerza electromotriz inducida en el secundario, la que, de acuerdo con la ley de Faraday, es tanto mayor cuanto mayor es la variación del flujo en el tiempo. Aquel efecto se contrarresta conectando en derivación en el circuito primario un condensador C, lo cual fué una idea de Fizeau. Vale decir, pues, que el objeto fundamental del condensador C es acelerar la extinción de



la corriente en el primario, cuando se abre el circuito. En la fig. 273 está representado un buen modelo de inductor de Ruhmkorff. La bobina primaria está constituída por varias bobinas independientes que pueden conectarse en serie.

8. Interruptores. — En la representación esquemática de la bobina que terminamos de describir (fig. 272), está dibujado el interruptor a martillo, de Neff, el cual consiste en una varilla elástica de acero V fija en uno de sus extremos y que lleva en el otro, que está frente al núcleo de la bobina, un trocito de hierro dulce h. Detrás de éste se encuentra, en su inmediata proximidad, la punta de pla-

tino en que termina un tornillo T. Haciendo girar a éste se hace contacto en h con la punta de platino, con lo que se cierra el circuito de la batería E a través del primario. La corriente que fluye por él imanta al núcleo de hierro, el cual atrae al martillo de Neff abriendo el circuito. Cesa así la corriente y la imantación del núcleo. El martillo,

por la elasticidad de la varilla V, vuelve hacia atrás haciendo contacto en la punta de platino, cerrando, otra vez, el circuito. El proceso que acabamos de describir se repite, pues, periódicamente.

El martillo abre y cierra el circuito gran número de veces por segundo.

El interruptor de Wehnelt consiste (fig. 274), en una lámina de plomo L y una

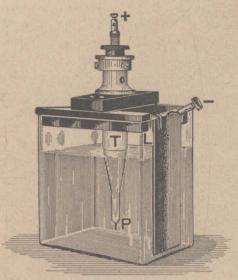


Fig. 274.

varilla del mismo metal que va dentro de un tubo T de porcelana que termina en un hilo de platino P que sale a través de un orificio de aquel tubo, inmergidos en una masa de agua acidulada con ácido sulfúrico contenida en un gran vaso de vidrio.

Si se intercala ese dispositivo en un circuito de unos 60 Volt, provisto de una autoinducción apreciable, se oyen estridencias que se suceden muy rápidamente. El examen del proceso enseña que al enrojecerse la punta de platino por el pasaje de la corriente se produce una vaporización rápida y una disociación, determinando el gas así formado

una interrupción de la corriente. Restablecido el contacto, en seguida, entre el platino y el líquido, el fenómeno se reproduce, v así sucesivamente.

Las interrupciones se producen satisfactoriamente cuando la punta de platino es el polo positivo. Su número es



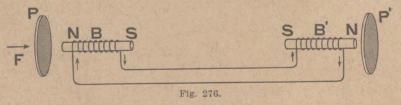
Fig. 275.

muy grande, en general de algunos centenares por segundo. Para accionar una bohina de Ruhmkorff con este interruptor, debe desconectarse el condensador.

El interruptor de Simon (fig. 275), se funda en el mismo principio que el de Wehnelt. El proceso que se cumple en éste sobre la punta de platino se realiza en aquél en uno o más orificios O de pequeño diámetro, practicados en el extremo inferior de un tubo T cilíndrico de porce-

lana o de vidrio Pirex, en cuyo interior se encuentra un electrodo consistente en una varilla de plomo.

9. Teléfono y micrófono. — El teléfono fué inventado por Bell en el año 1875. Su funcionamiento se puede explicar

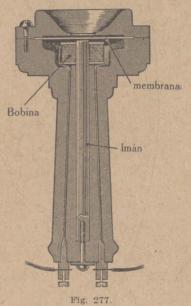


mediante la instalación esquemática de la fig. 276. B y B' son dos barras imantadas provistas cada una de ellas de un arrollamiento, es decir, de una bobina. Estas bobinas forman parte de un mismo circuito. P y P son dos delgadas membranas de hierro situadas muy próximas a los polos de los imanes.

Si la membrana P se acerca al imán, se produce una variación del flujo a través de la bobina correspondiente. La fuerza electromotriz que esa variación produce, engendra una corriente eléctrica que incrementa, momentáneamente, la imantación del otro imán y la fuerza de atracción de sus polos. P' será atraída, por lo tanto, hacia el

imán tan pronto como P se acerca al suyo. Si P vibra por la acción de ondas acústicas, siguiendo el ritmo de la voz humana, p. ejem., las corrientes inducidas y, por consiguiente, P' seguirán el mismo ritmo. La membrana P' reproducirá, pues, por sus impulsos en el aire circundante, la voz que hace vibrar a P. La fig. 277 enseña uno de los dispositivos frecuentes de los tubos telefónicos.

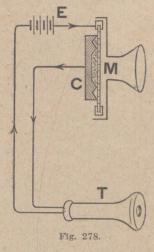
En el dispositivo de Bell la energía de la corriente eléctrica inducida que permite la transmisión del ritmo de *P* a *P*', proviene de la energía



vibratoria que comunican a P las ondas acústicas. Aquella energía es muy débil, lo que constituye un inconveniente para las transmisiones a cierta distancia.

El micrófono, descubierto entre los años 1878 y 1879, permite hacer fluir por el circuito corrientes relativamente intensas que siguen el ritmo de las ondas acústicas que inciden sobre él, porque su resistencia varía según ese mismo ritmo.

En la fig. 278 está representado un tipo de micrófono instalado en parte de un circuito telefónico. C es una pieza de carbón frente a la cual se encuentra, a muy



pequeña distancia, una delgadísima mebrana M. Entre esta membrana y aquella pieza existe una cavidad que está llena de granos de carbón.

Si se hace vibrar a *M*, hablando, p. ejem., delante de la bocina, se modifican los contactos entre los granos y los de éstos con el trozo *C* de carbón y con la membrana. La resistencia y, por consiguiente, la corriente eléctrica que engendra la fuerza electromotriz de la batería *E* varía, así, siguiendo el ritmo de aquellas vibraciones.

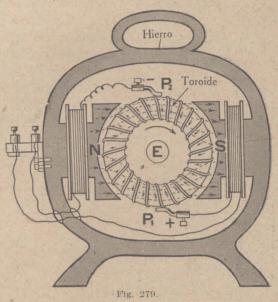
El receptor telefónico T reproduce la voz en la forma ya explicada. El micrófono hace, pues, variar la intensidad de una corriente ya existente.

10. El anillo de Gramme. — Por más que con anterioridad a la construcción de Gramme (1871) se habían ideado diversos dispositivos para producir energía eléctrica mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, fué su máquina la primera que resolvió el problema práctico de la producción de fuerzas electromotrices constantes y de una intensidad cualquiera.

En la fig. 279 está representado esquemáticamente el anillo de Gramme, del cual nos ocupamos ya al tratar el motor eléctrico. Un toroide de hilos de hierro que lleva un arrollamiento o bobina, cerrado sobre sí mismo, gira entre los polos de un electroimán, que es excitado por la misma corriente que se genera, en el sentido de la flecha F. Las líneas de fuerza del campo magnético fluyen, en su mayoría, por dentro del anillo de hierro. Es fácil ver que, de acuerdo con la ley de Faraday, la fuerza electro-

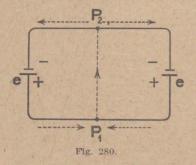
motriz inducida tiene en todas las espiras de la derecha de la línea de simetría P_1P_2 (línea que no ha sido trazada), el sentido que indican las pequeñas flechas situadas a sus costados y en las de la izquierda el opuesto.

Si, como suponemos, el campo y el arrollamiento son per-



fectamente simétricos, las fuerzas electromotrices que obran, respectivamente, en los dos grupos de espiras que hemos considerado son iguales y opuestas. Por lo tanto, en la bobina no existe una corriente eléctrica. El potencial en cambio, tiene un máximo positivo en P_1 y un máximo negativo en P_2 . Si en esos puntos se hace contacto con dos escobillas y partiendo de ellas se cierra el circuito a través de una resistencia R_e (resistencia exterior), fluirá por él, en seguida, una corriente eléctrica. Está claro que a la vez circulará una corriente por las espiras en los sentidos de las flechas.

Ocurre, en este caso, lo análogo que cuando se tienen dos pilas, p. ejem., en oposición (fig. 280). Si sus fuerzas electromotrices son iguales, la corriente en el circuito que ellas constituyen es nula, mientras que los potenciales



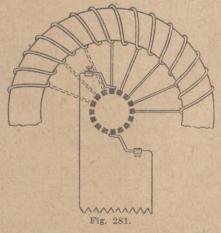
tienen de ambos lados de ellas valores diferentes. Si se unen los puntos P_1 y P_2 , fluye, en seguida, una corriente eléctrica no sólo por el nuevo conductor intercalado sino, también, por los conductores primitivos.

El trabajo que gastan las fuerzas electromotrices producidas por inducción, es el equi-

valente — si excluimos ciertas pérdidas — del trabajo mecánico que es menester insumir para hacer girar las espiras con corriente del anillo en el campo magné-

tico, venciendo las fuerzas ponderomotrices que, de acuerdo con la ley de Lenz, se oponen a la rotación.

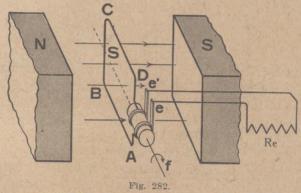
Máquinas que producen energía eléctrica proveniente de energía mecánica, que a su vez se produce quemando carbón o petróleo, p. ejem., o la energía de caídas de agua, se llaman generadores eléctricos. También



se las suele llamar *dinamos*. En la realidad el arrollamiento no consiste en una sola bobina sino en varias, (fig. 281), cuyos extremos se unen a las piezas metálicas de un colector a múltiples sectores que va montado

en el eje material de rotación y sobre el cual hacen contacto las escobillas.

11. Nociones sobre corriente alternada. — I. Producción. — Supongamos (fig. 282), que una espira de forma rectangular, está animada de un movimiento de rotación, en el sentido de la flecha f, en torno de un eje que coincide con su eje longitudinal de simetría, que es normal a la dirección de las líneas de fuerza de un campo magnético en el cual aquélla se encuentra. Los extremos de la espira están unidos, respectivamente, a dos anillos metálicos

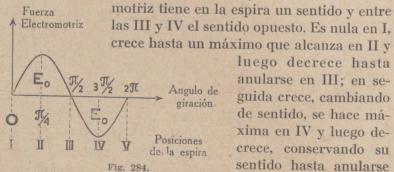


montados sobre el eje de rotación, sobre los cuales se apoyan dos contactos metálicos e, e'. A éstos se conectan conductores exteriores, constituyendo un circuito.

Veamos lo que sucede mientras la espira da una vuelta. Durante el pasaje por la posición elegida como inicial (figs. 282 y 283, I), la variación de flujo es cero y, por lo tanto, la fuerza electromotriz es, en ese instante, nula. Al pasar de la posición I a la II, fig. 283, la variación del flujo crece, haciéndose máxima en la II. A partir de esta posición la variación del flujo comienza a decrecer, pero como el flujo mismo entra por la otra cara de la espira, la fuerza electromotriz conserva en ella el mismo sentido, siendo el que indican las flechas en la fig. 283, II. En la

posición III la variación del flujo se hace cero y, por lo tanto, la fuerza electromotriz es, en ese instante, nula otra vez. Al pasar de la posición III a la IV, la variación del flujo comienza a crecer y, por consiguiente, la fuerza

electromotriz tiene un sentido opuesto al anterior. Se hace un máximo en la posición IV y comienza a decrecer a partir de ella, conservando su signo para anularse en la posición V, que no es sino la inicial. A partir de allí crece cambiando de signo. En suma, entre las posiciones I y III la fuerza electro-



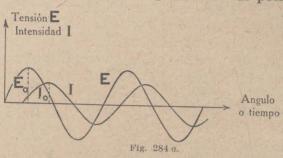
las III y IV el sentido opuesto. Es nula en I, crece hasta un máximo que alcanza en II y luego decrece hasta

anularse en III: en seguida crece, cambiando de sentido, se hace máxima en IV y luego decrece, conservando su sentido hasta anularse en V. Si la espira da n

vueltas por segundo con movimiento uniforme ese proceso se cumple idénticamente a sí mismo n veces por segundo también.

No es difícil demostrar que esa fuerza electromotriz es sinusoidal, es decir, que está representada por una seno-línea, tal como la de la fig. 284. El eje de las ordenadas representa la fuerza electromotriz y el eje de las abscisas el ángulo de giración de la espira, lo que da su posición. Entre O y $\pi/2$, o, lo que es igual, entre las posi-

ciones I y III las ordenadas de la curva. que dan la fuerza electromotriz, van hacia arriba. son positivas: entre $\pi/2$ y 2π van hacia aba-



jo, son negativas. Esto corresponde a los sentidos opuestos antes citados

Una fuerza electromotriz así se llama alterna. Una fuerza electromotriz alterna engendra en un circuito una

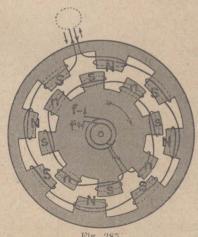


Fig. 285

corriente del mismo carácter, que, por lo común se retrasa respecto a aquélla, vale decir, que alcanza los valores homólogos más tarde que la fuerza electromotriz, fig. 284 a.

En la fig. 285 se ha representado, esquemáticamente, un alternador de los usados en la técnica. La parte externa, que es el inducido, está en reposo por lo que se le suele llamar "Stator". Es multipo-

lar. Las bobinas de dos polos vecinos están devanadas en sentidos opuestos. Lo mismo pasa en las bobinas del inductor. A éste lo supondremos en movimiento en el sentido de la flecha. Como los devanados de dos bobinas consecutivas del inducido tienen sentidos opuestos al pasar frente a ella dos polos del inductor, producen en las mismas fuerzas electromotrices del mismo sentido. En la siguiente coincidencia de polos, el sentido es el opuesto.

La fuerza electromotriz es máxima cuando los polos del inductor y del inducido se enfrentan y es nula en las posiciones intermedias simétricas de los polos. La fuerza electromotriz cambia de signo al pasar de una coincidencia de polos a la siguiente, como ya lo dijimos. En las redes de las ciudades, el número de alternancias es ordinariamente, de 50 por segundo.

II. Tensión e intensidad eficaz de una corriente alterna hace desviar la aguja de un voltimetro o amperimetro a hilo caliente porque el efecto Joule depende, como es sabido, del cuadrado de la intensidad, de modo que el cambio de sentido de la corriente no influye sobre él.

¿Qué representa la indicación del voltímetro o del amperímetro, respectivamente, suponiendo que sus escalas corresponden a corriente continua? Esas indicaciones se llaman tensión e intensidad eficaz, respectivamente y se suelen representar, como lo hacemos nosotros, con los símbolos E_{ef} e I_{ef} . Equivalen, insistamos, a la tensión y la intensidad de una corriente continua que produce iguales desviaciones.

La tensión y la intensidad eficaz de la corriente alterna, están ligadas a las amplitudes E_o e I_o de ésta por las expresiones

$$E_{ef} = \frac{E_o}{\sqrt{2}} = 0,707 \ E_o$$
 $I_{ef} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} = 0,707 \ I_o.$

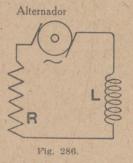
Si, p. ejem., un amperimetro indica la misma desviación que produce una corriente continua de una intensidad I=10 Ampère, la intensidad eficaz es de 10 Ampère, es decir, $I_{ef}=10$ Ampère y, por lo tanto, la amplitud de la corriente alterna es

$$I_o = \frac{I_{ef}}{0.707} = \frac{10}{0.707} = 14,14$$
 Ampère.

En el momento en que la corriente tiene el valor máximo, su intensidad es, pues, de 14,14 Ampère. Análogamente se calcula la amplitud E_o de la tensión, en su caso.

III. IMPEDANCIA. — Supongamos que se tiene un circuito como el de la fig. 286. Una tensión alterna (que se indica con el símbolo \sim) de amplitud E_{θ} y de la frecuencia n

obra en un circuito que tiene la resistencia óhmica R y que lleva una autoinducción L. Mientras la intensidad de la corriente crece, el campo magnético crece también, lo que implica un almacenamiento de energía y una variación de flujo a través de la bobina y, por lo tanto, la acción continua de una fuerza electromotriz de autoinducción; cuando la intensidad de la corriente

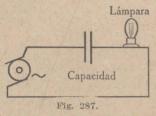


decrece, la energía del campo magnético disminuye restituyéndose al circuito en la corriente de autoinducción. Debido a eso, la existencia de la autoinducción, representa "una resistencia", en el sentido genérico de la palabra. El cálculo enseña que la amplitud I_o de la corriente está ligada a la amplitud E_o de la tensión por la expresión

$$I_o = rac{E_o}{\sqrt{R^2 + 4 \ \pi^2 n^2 L^2}}.$$

El denominador, que es una raíz, representa, pues, una resistencia efectiva que se llama impedancia.

IV. Influencia de una capacidad. — Si se tiene en un circuito, donde obra una tensión alterna, una capacidad



(fig. 287), en serie con una lámpara eléctrica, ésta se enciende, lo que no sucede si la tensión es continua, Todo sucede como si la corriente alterna pasase a través del condensador. Lo que ocurre es que durante medio pe-

ríodo éste se carga, para descargarse en el medio período siguiente.

CAPÍTULO XVII

OSCILACIONES ELÉCTRICAS

1. Descarga oscilatoria de un condensador. — Ya hemos visto que si se toca una de las armaduras de un condensador cargado con una de las ramas de un excitador, al acercar la rama restante a la otra armadura, se produce una descarga. La chispa es luminosa y de ruido seco.

Por más que muchos investigadores se ocuparon del estudio de este fenómeno se debe a Feddersen (1832-1918), el conocimiento experimental de su naturaleza. Feddersen examinó la chispa, proyectando su imagen sobre una pantalla, previa reflexión en un espejo rotatorio. Comprobó así que la descarga se hacía oscilatoria cuando la longitud del conductor, en el cual está intercalado el chispeador, y que va de una armadura a otra, pasaba de cierto valor, siendo, no obstante, pequeña su resistencia. En tal caso se advierte que la proyección de la chispa no constituye, al girar el espejo, un trazo luminoso continuo, sino un trazo compuesto por zonas luminosas nítidas, separadas por breves zonas de menos luminosidad.

Podemos representarnos el proceso considerando a la electricidad como un flúido ideal, que tiene "niveles" diferentes en las armaduras. Si éstas se unen por un conductor, el flúido se precipita hacia la armadura de nivel menor. Por inercia, en virtud de la "energía de movimiento" almacenada, alcanza en ella un nivel mayor que el correspondiente a la posición de reposo, por cuya razón se precipita, enseguida, hacia la armadura primitiva. El

proceso se continúa hasta la extinción total de la energía por roce. El flúido oscila, pues, entre una armadura y otra. Lo que hemos llamado "energía de movimiento" es la energía del campo magnético de la corriente. Cuando el flúido alcanza el nivel máximo en una de las armaduras, su movimiento es, en ese instante, nulo y nula, por lo tanto, la intensidad de la corriente y la energía del campo magnético que la acompaña. Toda la energía es potencial, es decir, está almacenada en el campo eléctrico del condensador. El proceso es, en definitiva, semejante al del péndulo. Se trata de una conversión continua de energía potencial (eléctrica) en energía de movimiento (magnética) y recíprocamente.

La teoría enseña que la descarga se hace oscilatoria cuando entre la capacidad C, la resistencia óhmica R del circuito y la autoinducción L, existe la relación:

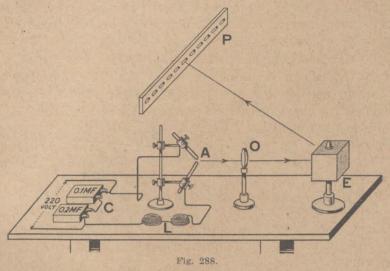
$$R^2 < rac{4 \, L}{C}$$

y que el tiempo T de una oscilación está dado por la fórmula

$$T = 2 \pi \sqrt{LC}.$$
 [1]

2. Un experimento de curso. — La fig. 288 permite realizar la comprobación de Feddersen. La capacidad, representada por C, consiste en un grupo de condensadores de varios Micro - Farad de capacidad que se acoplan en serie o en cantidad para variar la capacidad; L es la autoinducción, que puede formarse con dos rollos de conductor de cobre, con aislación para 220 Volt. y A un arco voltaico con carbones sin mecha. Estos están conectados a la red del alumbrado a través de una resistencia de unos 150 Ohm.

Si se enciende el arco, para cierta distancia entre los carbones, se oye un sonido que revela la existencia de un proceso periódico en su llama. Si se disminuye la capacidad o la autoinducción, aquel sonido adquiere mayor altura; y, al mismo tiempo, el trazo luminoso se hace continuo. Si se proyecta la chispa sobre una pantalla P, mediante el objetivo O, a través de un espejo rotatorio E, se observa un trazo



de luminosidad discontinua. El sonido desaparece si se saca la llave M, lo que implica excluir del circuito del arco el circuito oscilatorio.

3. Resonancia eléctrica: experimento de Lodge. — Vimos en este mismo tomo que una varilla vibra por la acción de un movimiento vibratorio de cierta frecuencia aplicado al soporte en que está fija y que un diapasón vibra, también, por la acción del movimiento vibratorio que le transmite mediante el aire otro diapasón del mismo período que oscila a cierta distancia de él. Lo análogo sucede con las oscilaciones eléctricas. La diferencia estriba en que las fuerzas no se transmiten en este caso, a través de la materia ponderable sino por el éter.

Ya sabemos que una corriente eléctrica proviene de la existencia de una fuerza eléctrica y que aquella va acompañada de un campo magnético. Si la fuerza eléctrica oscila, es oscilatoria la corriente y la fuerza magnética. Por la acción de cualquiera de esas dos fuerzas o por ambas a la vez puede hacerse oscilar otro circuito que sea capaz de cumplir oscilaciones.

Es clásico el experimento de Lodge. Su instalación está representada en la fig. 289.

Se trata de dos circuitos constituídos por dos botellas de Leyden iguales y autoinducciones formadas por dos rectán-

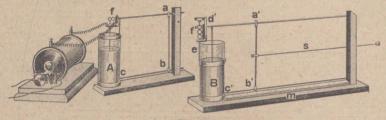


Fig. 289.

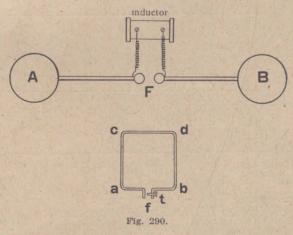
gulos de igual altura. El circuito que se hace oscilar primero, que por esto se llama *primario*, lleva un chispeador f, en el cual se conectan los bornes de una bobina de Ruhmkorff, y la autoinducción rectangular del que se hace *resonar*, que constituye el secundario, es variable: uno de sus lados es movible. Por desplazamiento de éste se varía el tiempo de oscilación del circuito, de acuerdo con la [1]. Cuando este tiempo es casi igual al del primario, se advierte una chispa en f, que es un chispeador puesto en derivación de la capacidad.

Líneas de fuerza del campo magnético de la corriente del primario abrazan al secundario y como la corriente es oscilatoria, lo es la fuerza magnética que, por inducción, excita al circuito últimamente nombrado. Circuitos así se dicen acoplados magnéticamente. La energía que representa la corriente oscilatoria del secundario no es sino parte de la energía del primario. La energía pasa de éste al otro circuito y recíprocamente.

4. Ondas hertzianas. — I. Generalidades. — En el año 1888 comprobó Hertz, mediante experimentos que describimos más adelante, que como lo había predicho Maxwell, las energías eléctrica y magnética de un circuito o conductor en el que se cumplen oscilaciones eléctricas, se propagan en el medio circundante, mejor dicho, en el éter en forma ondulatoria; que el conductor es un centro de irradiación de ondas electromagnéticas transversales; que en la dirección de cada rayo se propagan los campos eléctricos y magnéticos, siendo sus direcciones de vibración normales al rayo y entre sí.

II. Los fenómenos de resonancia con osciladores abiertos. — La fig. 290 representa la instalación que em-

pleó Hertz en sus primeros experimentos (fines del año 1886) de entre los que caben destacar los de resonancia. Quedó evidenciado con ellos que ese fenómeno se produce aun



cuando el oscilador no consista en un circuito cerrado, sino en uno *abierto*. El oscilador estaba constituído como el mismo investigador lo dice en sus memorias, por un grueso alambre rectilíneo de cobre de 3 metros de longitud unido en sus extremos con dos esferas de 30 cm. de diámetro, interrumpido en su parte media por un espacio de chispa F de 34 de cm., entre pequeñas esferas de latón.

El circuito que hacía resonar, esto es el resonador, era un rectángulo formado por un grueso alambre de cobre provisto de un pequeño espacio f de chispa. Puso de manifiesto la resonancia, afinando el resonador al oscilador, variando la longitud del lado de aquél. Para 75 cm. de lado obtuvo en f chispas muy vivas a dos metros de distancia.

III. Ondas electromagnéticas estacionarias. — En los experimentos que acabamos de referir, Hertz había observado fenómenos de reflexión de las fuerzas eléctrica y magnética, los cuales demostraban la existencia de las ondas electromagnéticas. Esos fenómenos los hizo patentes

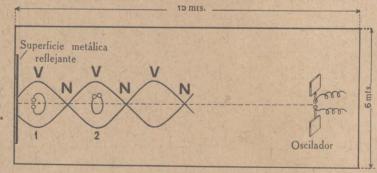


Fig. 291.

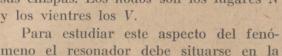
produciendo ondas estacionarias de esa naturaleza (véase el capítulo III. Estos experimentos los realizó en un salón del Instituto de Física de Kalsruhe de 15 metros de largo, 6 de alto y 14 de ancho.

En la fig. 291 aparece, en sus proporciones exactas, la instalación. El oscilador, que situó verticalmente, consistía

en dos placas cuadrangulares de latón de 40 cm. de lado, unidos por un grueso alambre de cobre con una interrupción o chispeador en su punto medio.

Hertz investigó la distribución de la fuerza eléctrica

en el interior mediante un resonador circular (fig. 292), de 35 cm. de diámetro, con cuvo tamaño estaba en resonancia con el oscilador. Pudo comprobar así la existencia de ondas eléctricas estacionarias, es decir, observó máximos v mínimos bien pronunciados en la excitación del resonador, excitación que se manifiesta en sus chispas. Los nodos son los lugares N v los vientres los V.



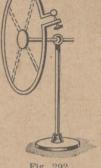


Fig. 292.

posición 1, pues la fuerza eléctrica es vertical, como el oscilador, de modo que predomina su acción sobre la mitad del resonador situado de un lado de la vertical, que

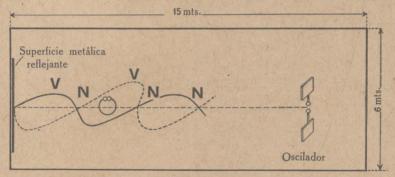


Fig. 293.

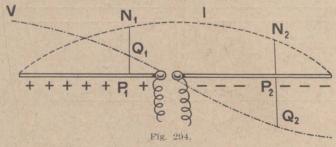
no tiene solución de continuidad. En la 2 las acciones sobre ambas mitades del resonador situados de uno y otro lado de la vertical son iguales y opuestas, de modo que reciprocamente se anulan.

El largo de onda resultó ser de 4,9 metros. La propagación de la fuerza eléctrica va acompañada de la de la fuerza magnética. Ambos hechos no son sino aspectos diferentes de un mismo proceso. Este fenómeno se comprueba situando el resonador como aparece en la fig. 293.

Resulta, pues, como ya se dijo, que tanto la fuerza eléctrica como la magnética, que son perpendiculares entre sí, son normales a la dirección de propagación. Las ondas electromagnéticas son, como las de la luz, transversales. Son, en verdad, de igual naturaleza.

La experiencia enseña, además, que esas ondas se propagan en el vacío, es decir, en el éter, con igual velocidad que las de la luz.

5. El oscilador lineal. — Si se suprimen las esferas del oscilador de la fig. 290, se tiene un oscilador lineal, de modo que éste está constituído (fig. 294), por un alambre (por lo común de cobre), de diámetro pequeño en relación a su longitud, con un chispeador en su parte media. Si, mediante un inductor de Ruhmkorff, p. ejem., una mitad



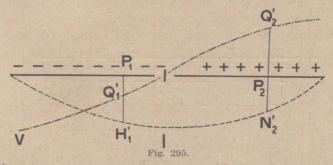
se carga con electricidad positiva y la otra con negativa, cuando la diferencia de potencial entre ellas alcanza cierto valor, que depende de la forma del chispeador y del tamaño de la interrupción, estalla una chispa y se produce un proceso oscilatorio que abarca todo el oscilador. En éste se producen ondas electromagnéticas estacionarias

que son formalmente análogas a las longitudinales de las barras y de los tubos. En estas últimas oscilaciones están en juego dos magnitudes: el movimiento de los elementos de masa y la presión en ellos; en los lugares donde la amplitud del movimiento tiene un vientre, la presión tiene un nodo.

En el caso eléctrico las magnitudes en juego son: el potencial y la intensidad de la corriente.

Los nodos de ésta están en los extremos del oscilador y aquél tiene en esos lugares sus vientres. El potencial tiene un nodo en el punto medio, en el sitio de la chispa, y la intensidad un vientre. Como, por otra parte, el proceso consiste en una transformación continua de la energía magnética (que equivale a la cinética), en energía eléctrica (que es la potencial), en los instantes en que la intensidad de la corriente es cero en todos los puntos del oscilador, el potencial alcanza el mayor valor, y viceversa, lo que sucede cada medio período, pues en esos instantes la corriente se hace cero y cambia de sentido.

En la fig. 294 las líneas de puntos representan las distribuciones de potencial y de la intensidad de la corriente,



cuando aquél y ésta alcanzan sus valores máximos. Corresponden, como sabemos, a instantes separados por un intervalo igual a la mitad de un período. En el punto P_1 la intensidad de la corriente, representada por P_1N_1 , va de

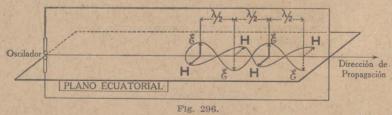
izquierda a derecha y el potencial P_1Q_1 es positivo; en P_2 la corriente P_2N_2 tiene el mismo sentido anterior mientras que el potencial P_2Q_2 es negativo.

En la fig. 295 están representadas las distribuciones de la intensidad y del potencial correspondientes a instantes separados de los anteriores por medio período. La mitad de la izquierda está cargada negativamente y la de la derecha positivamente. En P_1 la corriente $P_1N'_1$ va de izquierda a derecha y el potencial P_1Q_1 es negativo; en P_2 la corriente $P_2N'_2$ tiene el mismo sentido anterior mientras que el potencial $P_2Q'_2$ es positivo.

La oscilación que hemos descripto es la fundamental, cuya longitud de onda es el doble que la del oscilador.

Está claro que el oscilador lineal puede ser el asiento de todas aquellas ondas estacionarias que tengan vientres del potencial en los extremos y uno de sus nodos en el punto medio. La mitad del oscilador es pues $^{1}/_{4}$ λ en la oscilación fundamental y $^{3}/_{4}$ λ , $^{5}/_{4}$ λ , etc., en las demás, que serían las armónicas (reléase las ondas estacionarias en barras, cuerdas y tubos).

6. El campo electromagnético de un oscilador lineal. — Un oscilador lineal irradia energía ondulatoria en todas las direcciones que parten de él. La radiación es más in-



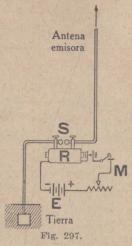
tensa en las direcciones normales al oscilador en su punto medio, las cuales se encuentran en su plano ecuatorial (fig. 296). La teoría enseña que en puntos situados a distancias, r, del oscilador, grandes en relación a la longitud de onda, que es el doble de la del oscilador, las amplitudes de los campos magnéticos y eléctricos son inversamente proporcionales a r. Además, en un punto dado, en el mismo instante que la intensidad del campo eléctrico tiene el valor máximo, es máxima la del campo magnético. Es decir, que esas intensidades tienen la misma fase.

En la fig. 296 se ha representado una onda electromagnética, en cierto instante, en una de las direcciones del plano ecuatorial. Los extremos del vector eléctrico están sobre una sinusoide (si dejamos de lado, para mayor simplicidad, su decrecer con r), en el plano vertical que pasa por el oscilador y los extremos del vector magnético sobre una sinusoide en el plano horizontal, que es normal al oscilador. Ambos vectores, que son normales entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación, son inseparables, constituyen esa entidad física que es la onda electromagnética.

Las ondas electromagnéticas, son, pues, transversales. En lugar de vibrar transversalmente el éter como en la teoría mecánica de la luz, vibran transversalmente las fuerzas eléctricas y magnéticas. La teoría mecánica de la luz, con el movimiento de las partículas de éter, ha sido provisoria. Un rayo de luz no es sino una onda electromagnética de pequeña longitud.

7. Telefonía y telegrafía sin hilos. — A. Los experimentos de Marconi. La excitación de Braun. — Los descubrimientos de Hertz hicieron posible la transmisión electromagnética de señales a la distancia sin necesidad de hilos conductores. Su muerte prematura, acaecida en el año 1894, dió término a su actividad infatigable sin que se hubiese podido ocupar de las aplicaciones de sus hallazgos, como estaba en sus planes.

Correspondió al ingeniero italiano Marconi la gloria de demostrar, experimentalmente, aquella posibilidad, fun-

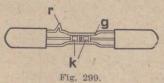


dando la telegrafía sin hilos. En el año 1896 logró transmitir telegramas a una distancia de 18 km., aproximadamente. Su instalación primitiva era muy simple. La estación transmisora consistía (fig. 297) en un conductor lineal, con una interrupción o chispeador S provisto de dos pequeñas esferas, uno de cuyos extremos terminaba en la tierra. Este oscilador era alimentado por el secundario de un inductor R en cuyo circuito primario estaba intercalado un manipulador Morse M.

La estación receptora (fig. 298),

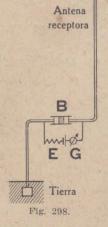
estaba constituída por un resonador idéntico al oscilador, con lo cual se aseguraba la afinación, que llevaba un

cohesor de Branly, el cual consiste en un tubo de vidrio, con dos electrodos metálicos K (fig. 299), entre los cuales se encuentran pequeños pedazos de metal, tales como limaduras, p. ejem. En las condiciones ordinarias, un cohesor tiene una resistencia eléctrica sumamente grande que disminuye, de modo notable, si a su través pasa una



corriente de gran frecuencia, como las de las oscilaciones eléctricas.

Si en derivación del cohesor



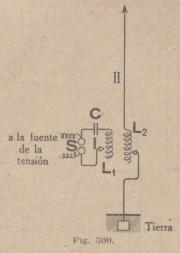
B, que forma parte del receptor, se tiene una pequeña batería y un galvanómetro G (fig. 298), tan pronto como

la antena oscila bajo la acción de las ondas que llegan, el galvanómetro acusa una desviación.

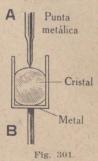
El cohesor puede ser restituído en seguida a su estado primitivo, y de una manera continua, mediante los golpes

de un pequeño martillo mantenido en movimiento oscilatorio electromagnéticamente.

La energía que se puede almacenar directamente en la antena por el procedimiento usado por Marconi, que es el mismo de los experimentos de Hertz, es muy pequeña, porque si la distancia explosiva de la chispa S pasa de ciertos límites, las oscilaciones se hacen sumamente amortiguadas y la capacidad del oscilador o antena es pequeña. Braun



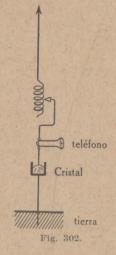
obvió ese inconveniente, en el año 1900, excitando la antena acoplándola magnéticamente, tal como enseña la fig. 300, a un circuito oscilatorio cerrado. Mediante la auto-



inducción variable L_1 pueden producirse en el primario, que es el circuito señalado con el número I, oscilaciones de diferente frecuencia. La antena, que es el secundario, se pone en resonancia con aquél mediante la autoinducción L_2 , que es variable también.

B. Los detectores a cristal. — Existen cristales que no obedecen a la ley de Ohm. Nos referiremos, en particular, al sulfuro

de plomo que se designa con el nombre de galena. Si se hace una instalación como la de la fig. 301 y se miden las intensidades de las corrientes que pasan a través del cristal para una diferencia dada de potencial, aplicada entre A y B, una vez en un sentido y otra en el opuesto, se observa que esas corrientes son muy diferentes. Todo pasa como si el cristal ofreciese una resistencia mucho mayor al pasaje de la corriente en un sentido que en el opuesto.



El cristal actúa, pues, como una *válvula*, ya que en un sentido la corriente es más intensa que en el otro.

Si se fiene una antena receptora como la de la fig. 302, que lleva en serie un teléfono y una válvula de cristal, en las oscilaciones que excitan en ella, por resonancia, las ondas que llegan de la estación emisora, la corriente en un sentido es mucho mayor que en el opuesto. Todo sucede como si por el teléfono pasase una corriente, de intensidad variable, en un solo sentido, la cual lo hace vibrar.

Si las ondas de la estación emisora tienen un ritmo, el de las letras del alfa-

beto Morse o el de la voz humana, p. ejem., ese ritmo se comunica a la corriente que pasa por el teléfono y éste lo reproduce.

El dispositivo de la fig. 302 es muy simple. Pueden hacerse conexiones mucho más eficientes a la par que más complicadas.

En la actualidad se emplean como productores de oscilaciones y como válvulas a lámparas electrónicas.

CAPITULO XVIII

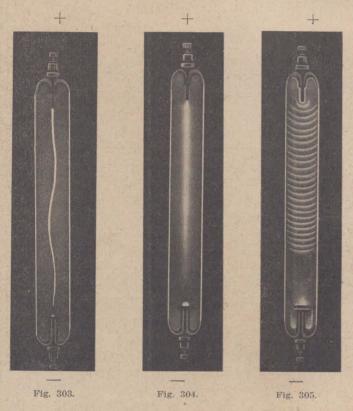
ATOMISMO DE LA ELECTRICIDAD

Descarga a través de los gases enrarecidos. Tubos de Plücker. Rayos catódicos, canales y rayos X.

1. Descarga a través de los gases enrarecidos. Tubos de Plücker. - La experiencia enseña que los gases enrarecidos se hacen conductores de la electricidad bajo la acción de fuerzas eléctricas elevadas. La conductibilidad alcanza un máximo para cierta presión a partir de la cual empieza a disminuir rápidamente a medida que el enrarecimiento aumenta. El pasaje de la electricidad va acompañado de fenómenos luminosos, cuvos caracteres dependen de la presión. El gas se enrarece en el interior de tubos de configuración variable, según los usos, a través de cuyas paredes pasan soldados, en diferente sitio, dos hilos de platino que llevan en sus terminaciones, dentro del recinto, electrodos, frecuentemente de aluminio, cuva forma cambia según el destino de la construcción. El primero en hacer construir estos tubos fué Plücker, en el año 1855, por lo que llevan su nombre o el de su vidriero Geissler.

La fuerza eléctrica que se aplica puede provenir de una máquina electrostática, de una batería de pequeños acumuladores o de un inductor de Ruhmkorff (4-5 cm. de chispa). El electrodo del tubo que está conectado con el polo positivo es el ánodo y el que está conectado con el negativo el cátodo. Si se emplea un inductor de Ruhmkorff, los polos son, prácticamente, los que corresponden

a la abertura del circuito primario, pues en tal caso la tensión es mucho más elevada que cuando se produce el cierre. En las figs. 303 a 307, están representados los aspectos que ofrece el nitrógeno a diferentes presiones contenido en tubos de 40 cm. de longitud y 4 cm. de diámetro pro-



vistos de un electrodo plano que se ha utilizado como cátodo y de un electrodo cilíndrico que ha servido de ánodo. En el caso de la fig. 303, donde la presión es de unos 40 cm., se ve partir del ánodo un haz luminoso, compacto, de color rojizo, que se ve adelgazando hacia el cátodo hasta desaparecer antes de llegar a éste. Ese haz constituye

la llamada luz *positiva*. Sobre el cátodo, que es plano, se advierte una pequeña región de luz azulada, que constituye la luz *negativa*. El espacio oscuro comprendido entre la luz negativa y la luz positiva se denomina espacio de Faraday. A medida que el enrarecimiento del gas aumenta

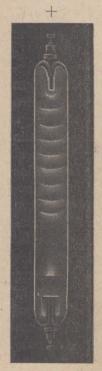


Fig. 306.

el haz de la luz positiva se ensancha y se hace más corto (fig. 304). A partir de 1 mm. de presión enseña hermosas estractificaciones (fig. 305), cuyas concavidades están hacia el ánodo. La luz negativa aumenta de volumen avanzando hacia el ánodo, a la vez que se separa del cátodo; su contorno hacia este electrodo es nítido, lo cual no sucede del lado del ánodo.

Aparece también sobre el ánodo un disco luminoso rosáceo. El espacio oscuro comprendido entre este disco luminoso y el contorno nítido de la luz negativa se llama espacio oscuro de Crookes. A la presión de 0,5 mm. (fig. 306) las estractificaciones son anchas y más raras; la luz negativa ha ayanzado hacia el áno-

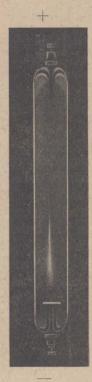


Fig. 307.

do y el espacio de Crookes es mayor. A partir de 0,1 mm. las estractificaciones desaparecen y la luz negativa que se ha ido alejando más y más, del cátodo llega casi hasta el ánodo.

Una diferencia fundamental entre las dos luces de que nos venimos ocupando se hace notoria si se experimenta en un tubo curvado de Geissler. En tal caso la luz positiva sigue todas las curvaturas del tubo, mientras que la negativa se comporta como una radiación que parte del cátodo sin que influya la posición del otro electrodo. A los 0,02 mm. (fig. 307), no hay vestigios de luz positiva y la luz negativa ha desaparecido, también, casi totalmente, mientras que las paredes del tubo comienzan a emitir una radiación verdosa de fluorescencia, particularmente frente al cátodo.

2. Los rayos catódicos. — Cuando la presión del gas alcanza valores del orden de los centésimos de milímetro el tubo de Geissler cambia de aspecto, según ya se dijo, lo que trasunta una nueva forma de la descarga. Todo acaece como si del cátodo, que es el disco que se ve en el centro del tubo (fig. 308), partiesen rayos en dirección de las normales a su superficie ya que si se sitúa frente a ese electrodo un cuerpo cualquiera su forma aparece dibujada sobre la pared del recinto, cuyo material, vidrio, emite una radiación verdosa de fluorescencia, en todas partes menos en ella.

Esos rayos se denominan catódicos. No son sino las trayectorias rectilíneas de partículas sumamente pequeñas, de electricidad negativa, que salen del cátodo bajo la acción de la fuerza eléctrica, que es allí considerable, ya que la caída de potencial en el cátodo es grande y tanto más cuando mayor es el vacío, y que obra en todo punto del electrodo en dirección normal. Tales partículas no son sino "granos" elementales de electricidad negativa, esto es, electrones negativos. La energía cinética de esas partículas puede ponerse de manifiesto por el tubo que enseña la fig. 309, cuyo cátodo es una calota esférica, y que lleva una delgada lámina de platino que pasa por el centro de la curvatura de aquel electrodo, orientada normalmente al radio central. Las partículas catódicas convergen así a la lámina y entregan por choque la energía de que van

dotadas en virtud de su movimiento, a causa de lo cual aquélla se enrojece vivamente.

Si se reciben los electrones en un electrodo que esté en conexión con un electrómetro podrá comprobarse que,



Fig. 308.

como se afirmó, la carga eléctrica que le es inherente es negativa. Esta comprobación fué efectuada por Perrin en el año 1895. Al mismo resultado se llega observando la desviación que experimentan bajo las acciones de la fuerza eléctrica y magnética, respectivamente.

Como experimento de curso, para hacer notorio el efecto de esta última fuerza, es muy cómodo operar con

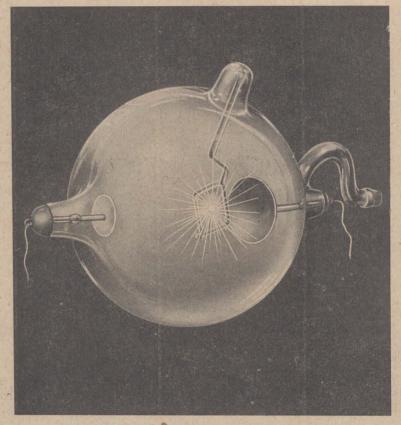


Fig. 309.

el tubo que enseña la fig. 310. Una lámina de aluminio situada en la cercanía del cátodo deja pasar, a través de una rendija practicada en ella, un haz, en forma de cinta, de rayos catódicos, los cuales inciden en diferentes

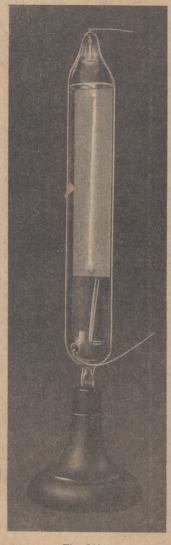


Fig. 310.

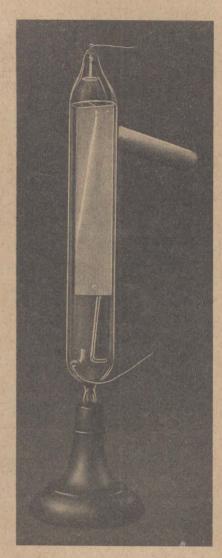
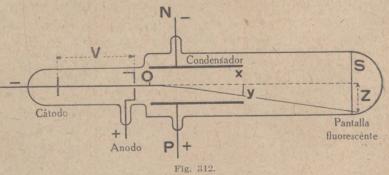


Fig. 311.

puntos situados sobre una faja recta, angosta, de una pantalla recubierta de una substancia fluorescente que está situada en la forma que enseña la figura. La radiación de fluorescencia hace visible la faja recta a que nos referimos más arriba v así se da cierto viso de "visibilidad" a los rayos. Si se acerca un imán al tubo en la forma que enseña la fig. 311, el trazo fluorescente se desplaza en el sentido que corresponde a una corriente eléctrica que estuviese dirigida hacia el cátodo; lo cual prueba no sólo que las partículas que parten de ese electrodo son negativas. sino que cargas eléctricas en movimiento se comportan como corrientes eléctricas, lo cual había sido demostrado por Rowland. Los ravos catódicos excitan, como en el caso del vidrio, la fluorescencia de muchos cuerpos. Existen minerales que emiten bajo la acción de sus choques radiaciones de fluorescencia de colores muy llamativos.

3. Los dos grandores fundamentales de las partículas catódicas. — A. Generalidades. — Aplicando las leyes de la mecánica a las acciones que ejercen los campos eléctrico y



magnético sobre las partículas catódicas es posible determinar estos dos grandores fundamentales: la carga específica, que es el cociente e_o/m entre la masa eléctrica y la masa mecánica de la partícula velocidad v de la misma. Indicaremos uno de los caminos.

B. APLICACIONES DEL TEOREMA DE LA ENERGÍA CINÉTICA. — En el tubo de rayos catódicos de la fig. 312, el ánodo tiene un orificio en su punto medio por el cual pasan las partículas catódicas. La velocidad v con que salen del mismo, es tanto mayor cuanto mayor es la diferencia de potencial V entre el ánodo y el cátodo. Si es e_o la masa eléctrica de una partícula, el trabajo de las fuerzas eléctricas entre aquellos electrodos es, por la definición de diferencia de potencial, e_oV . Ese trabajo se almacena en forma de energía cinética en la partícula, la cual está dada por $\frac{1}{2}$ mv^2 . Se tiene, pues,

$$e_oV = \frac{1}{2} mv^2$$
 [1]

 $v^2 = 2 \frac{e_o}{m} V$ [2]

C. Caída en un campo eléctrico homogéneo. — Las partículas llegan a O (fig. 312), con la velocidad v, normalmente a las líneas de fuerza de un condensador plano. Si, como suponemos, la intensidad \mathcal{E} del campo eléctrico del condensador es constante, las partículas describen una trayectoria curva, semejante a la que describe una piedra arrojada horizontalmente bajo la acción de la gravedad. El camino vertical y en que cae, mientras que se desplaza horizontalmente en el espacio Ox = x, entre las placas del condensador, bajo la acción del campo de intensidad \mathcal{E} , se calcula fácilmente. La fuerza que obra sobre una partícula es $e_o \mathcal{E} y$ como la aceleración, a, es el cociente entre la fuerza y la masa, la aceleración de la caída es

$$a = \frac{e_o \mathcal{E}}{m}.$$
 [3]

0

El espacio vertical y recorrido es, de acuerdo con las leyes del movimiento uniformemente acelerado,

$$y = \frac{1}{2} at^2$$
 [4]

y como es

$$t = \frac{x}{\nu},\tag{5}$$

si v es la velocidad de la partícula y x el camino recorrido en dirección Ox, mientras cae en y, resulta, introduciendo las [5] y [3] en la [4],

$$y = \frac{1}{2} \mathcal{E} \frac{e_o}{m} \frac{x}{v}$$
 [6]

donde x e y se pueden medir experimentalmente y \mathcal{E} es la diferencia de potencial entre las placas del condensador dividido por la distancia que las separa.

En realidad, las partículas inciden sobre una pantalla fluorescente S, donde producen, por choques, una escintilación, y sobre la cual se mide la caída z. Se obtiene, fácilmente, una fórmula un poco más complicada que la [6] pero, en lo fundamental, idéntica.

Mediante la [2] y la [6] se pueden calcular e_o/m y v. Los valores de v varían, naturalmente, con la diferencia de potencial. Son, comúnmente de $^1/_3$ a $^1/_5$ de la velocidad de la luz.

El valor de e_o/m no depende de las condiciones de la experiencia; cualquiera sea la naturaleza de los electrodos, el gas que primitivamente contenía el tubo y el potencial empleado, su valor es siempre el mismo. Es, por otra parte, imposible la identificación de las partículas catódicas con ninguna de las substancias conocidas, pues admitido el atomismo de la electricidad y supuesto que el valor de e_o es

un Quanta, resulta que el valor de *m* es alrededor de 1.850 veces menor que la masa de un átomo de hidrógeno.

Es forzoso concluir que tales partículas no son sino átomos de electricidad negativa. La partícula catódica es, pues, electricidad negativa en cultura pura, pór lo que se le da el nombre de electrón negativo.

De las numerosas determinaciones de la carga específica llevadas a cabo con diversos métodos, resulta que su valor más probable es 1,769.107 unidades electromagnéticas.

Con el fin de hacer más ostensibles las características del electrón, hagámosla aparecer en parangón con las del átomo de hidrógeno.

Las cargas están expresadas en unidades electromagnéticas y las masas en gramos.

ELECTRÓN NEGATIVO	Ion Hidrógeno H
$\frac{e_o}{m} = 1,769.10^7$	$\frac{e}{m_{_{\rm II}}} = 9649.4$
$e_o = 1,591,10^{-20}$	$e = 1,591.10^{-20}$
$m = 0.899.10^{-27}$	$m_{_{y}} = 1,649.10^{-24}$

4. Reseña histórica. — Los fenómenos luminosos que ofrecen los gases enrarecidos por el pasaje de la electricidad a su través fueron estudiados por Plücker, con fines espectroscópicos, alrededor del año 1885. La invención de la bomba de vacío a mercurio por Geissler, vidriero de Plücker, en el año 1857 hizo posible el estudio de la luminosidad de los tubos en función del enrarecimiento. Plücker, Davy, Hittorf, Varley, Crookes, Wiedemann, Riecke, Tait y el famoso Hertz, entre otros, se dan a la tarea de observar y discutir los fenómenos que se producían a medida que se extremaba la extracción del aire o gas del tubo, entre los años 1858 y 1892. El descubrimiento de que del

polo negativo o cátodo parten "rayos" no es la obra de un solo investigador. Contribuyeron al mismo varios de aquellos investigadores.

La interpretación del fenómeno dió lugar a notables discrepancias entre ellos. Varley, Crookes y Riecke llegaban a la conclusión de que los rayos catódicos consistían en corpúsculos cargados con electricidad negativa, mientras que Tait (1880), Wiedemann (1880); Heinrich Hertz y Helmholtz (1883) se oponían a esa concepción inclinándose a la suposición de que se trataba de un movimiento ondulatorio en el éter.

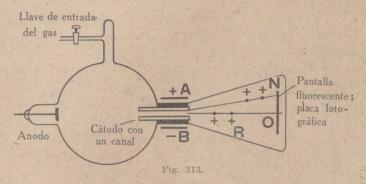
En carta fechada en Berlín el 29 de julio de 1883, Helmholtz le dice a Hertz, refiriéndose a sus investigaciones sobre esos rayos: "He leído su trabajo con mucho interés y no puedo menos que enviarle mi "bravo" por escrito. La cosa me parece del mayor alcance. Desde hace algún tiempo pienso si los rayos catódicos no son la forma de propagación de un choque instantáneo en el éter electromagnético de Maxwell. Según mi manera de ver una onda así se propagaría como lo hacen aquellos rayos. Entonces sería posible la desviación de las ondas por magnetización del medio".

La prueba definitiva de que se trataba de partículas de carga negativa fué dada por J. J. Thomson, en el año 1894, y por Perrin en el año 1895. El primero logró medir, como ya vimos, la velocidad de los rayos: su orden de magnitud evidenció que no se trataba de ondas luminosas. El segundo comprobó que un campo electrostático provocaba la desviación de los rayos que se comportaban como cargas negativas. Siguen luego medidas de e_o/m de Thomson (1897), Kauffman, etc.

5. Los rayos canales o rayos positivos. — Si se construye un tubo de rayos catódicos (fig. 313), con un cátodo provisto de un canal que lo comunica con otro recinto R, se

observa que a través de aquel orificio pasan a éste "rayos" que emiten luz. Esos rayos fueron denominados por Goldstein, quien fué el primero en observarlos en el año 1886, rayos canales.

Puesto que son desviados por los campos eléctrico y magnético, es forzoso admitir que se trata de corpúsculos



provistos de una masa eléctrica. Los sentidos de las desviaciones revelan que esa masa es positiva, por lo que se los llama, también, *rayos positivos*.

En el dispositivo de la fig. 313, tanto el campo eléctrico como el magnético, pueden aplicarse en la región A, B. Los corpúsculos desviados caen sobre una pantalla fluorescente, excitándola, o sobre una placa fotográfica a la cual impresionan. Mediante esas desviaciones es posible determinar la carga específica y la velocidad de los mismos. Se pone así, de manifiesto lo siguiente: que los rayos positivos son iones positivos del gas residual del tubo.

Si se llena el tubo de oxígeno, p. ejem., y se hace un vacío que no sea extremo y se lo excita luego, se revela, por el método de las desviaciones eléctrica y magnética la existencia de rayos positivos con una carga específica 16 veces menor que la del ion hidrógeno y de otros con una carga específica 8 veces menor que la del mismo ion.

Los primeros son iones de átomos de oxígeno con una sola carga elemental de electricidad positiva y los segundos iones de átomos del mismo cuerpo con dos cargas elementales.

El origen de los rayos positivos es el siguiente: los átomos están compuestos por una masa central o núcleo cargado con cierto número de "cuantas" de electricidad positiva en torno del cual giran, como los planetas en torno del Sol, un número igual de electrones negativos, por lo que, en el estado natural, los átomos son neutros. La descarga eléctrica disocia las moléculas, separa sus átomos, y los rayos catódicos al chocar con éstos arrancan del edificio de los mismos uno o más electrones, los que quedan, así, con un exceso de uno, dos, etc., "cuantas" de electricidad positiva. En estas condiciones son precipitados por la fuerza eléctrica hacia el cátodo y muchos de ellos atraviesan el canal.

Mediante el método de las desviaciones de los rayos positivos se ha comprobado que para iguales cargas eléctricas los valores de las cargas específicas de átomos de un mismo cuerpo son diferentes. Se llegó así a la conclusión de que existen, p. ejem., átomos de oxígeno de pesos 16, 17 y 18; átomos de nitrógeno de pesos 14 y 15 y así en casi todos los cuerpos. Esos átomos que tienen igual carga nuclear e igual número de electrones, por lo que sus propiedades químicas son idénticas, siendo por eso mismo químicamente inseparables, pero que tienen masas diferentes, se llaman *isotopos*. La naturaleza los da en proporciones diferentes y por eso los pesos atómicos de muchos cuerpos, que son los pesos atómicos medios de mezcla de isotopos, son fraccionarios.

6. Los rayos X.—En el año 1895 descubrió Roentgen que de los puntos fluorescentes de un tubo de rayos catódicos partía una radiación que tenía un gran poder de penetración en la materia. Esta conclusión fué el fruto de gran número de experimentos que realizó entre aquella fecha y el año 1897.

Roentgen observó, en sus primeros experimentos, que una pantalla recubierta con una capa de platino cianuro de bario, situada en las cercanías de un tubo de rayos catódicos accionado por un gran inductor de Ruhmkorff, se tornaba fluorescente, lo que era muy visible en la obscuridad, tanto cuando la substancia estaba del lado del tubo como en el caso opuesto. La fluorescencia se seguía manifestando aún intercalando entre la pantalla y el tubo un libro de 1.000 páginas, una hoja común de papel de estaño, tablas de madera, etc. Una lámina de aluminio de 16 mm. de espesor debilitaba la fluorescencia pero no lograba extinguirla. La radiación descubierta, a cuyos ravos dió Roentgen el nombre de rayos X, atravesaba, pueslos cuerpos mencionados. Aquel sabio pudo comprobar que todos los metales eran transparentes en mayor o menor grado a esos rayos figurando el platino y el plomo entre los más absorbentes. Una lámina del cuerpo últimamente nombrado de 1,5 mm. de espesor era prácticamente opaca para los mismos. Situando la mano sobre la pantalla de modo que quedase del lado del tubo pudo ver la "sombra oscura" de sus huesos en la sombra más clara de las fibras musculares, lo que demuestra que éstas son más transparentes a los rayos X que aquéllos.

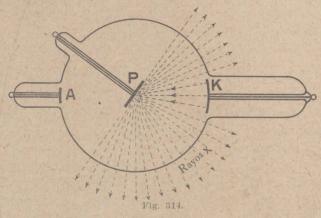
En un mismo cuerpo la transparencia para los rayos X depende exclusivamente del espesor.

El poder de absorción es tanto mayor cuanto mayor es el peso atómico.

Roentgen descubrió también que los rayos X tenían la propiedad de impresionar las placas fotográficas, lo que ocurría a través de sus envolturas por la transparencia de éstas, y de hacer conductor a los aisladores. Un cuerpo cargado, positiva o negativamente, en el aire o envuelto

en un aislador como parafina, p. ejem., se descargaba bajo la acción de los mismos.

Que los rayos partían, verdaderamente, de los sitios del tubo donde el choque de los rayos catódicos excita la fluorescencia del vidrio, lo comprobó desviando las partículas catódicas con un imán. Cambiaban así los lugares de la fluorescencia y los puntos de partida de aquéllos. Comprobó que todos los cuerpos emitían, aunque en diversas medidas, rayos X, haciendo incidir sobre ellos rayos



catódicos. El platino, p. ejem., emite rayos de más poder que el aluminio. A esto se debe que las primeras construcciones de tubos de rayos X tuviesen el aspecto que ofrece la fig. 314, en la cual el cátodo, K, es un espejo cóncavo de alumnio en las vecindades de cuyo centro de curvatura se encuentra una lámina de platino, P, sobre la cual, por consiguiente, inciden los rayos catódicos engendrando la luz de Roentgen. El ánodo es la placa A. La pieza de metal, en este caso, la lámina de platino P, sobre la cual inciden los electrones recibe el nombre de anticátodo. Si se emplea un poderoso inductor, con el fin de comunicar a los rayos catódicos una gran velocidad, se verá, si el tubo tiene un vacío elevado, una viva fluorescencia en parte de

sus paredes motivadas por la radiación X que parte del anticátodo por obra del choque de los electrones. En la fig. 315 se ve la instalación necesaria para obte-

ner, p. ejem., la radiografía de una mano. Esta se encuentra sobre una caja en cuyo interior está la película fotográfica y en la fig. 315 a se ve una reproducción de una parte de la radiografía.

En los tubos modernos, que funcionan con un vacío muy alto, el cátodo está



Fig. 315 a.

constituído por un filamento incandescente, por lo común de tungsteno, del cual se arrancan los electrones con tensiones muy altas.

Las investigaciones experimentales de los últimos quinquenios han evidenciado que la radiación de que nos ocupamos es electromagnética, es de-

cir de la misma naturaleza que la luz visible o ultravioleta, p. ejem., pero de una frecuencia mucho mayor. El largo de onda de los rayos X o, lo que es igual, de la luz de Roentgen, es del orden de 10^{-8} cm. La experiencia enseña que los rayos emitidos por un anticátodo dado, ofrecen un espectro continuo y uno de líneas, proveniente de la excitación de sus átomos. El espectro continuo proviene de la extinción de la energía cinética de los electrones por choque sobre la masa misma del anticátodo; son rayos ocasionados por el "frenaje" de los corpúsculos. La frecuencia máxima V_m de los mismos está dada por la expresión

$$e_o V = h v_m$$

donde e_{δ} es la masa eléctrica del electrón negativo, V la tensión máxima aplicada y h una constante universal descubierta por Planck.

CAPITULO XIX

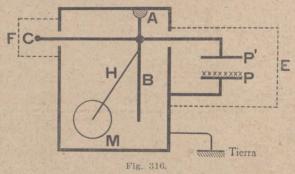
RADIOACTIVIDAD

1. Las observaciones de Becquerel. — H. Becquerel, fundándose en la observación de Roentgen de que los rayos X por él descubiertos partían siempre de los sitios fluorescentes del tubo, pensó en la posibilidad de que existiese una dependencia esencial entre la fluorescencia y aquella radiación. Con ese pensamiento investigó, en el año 1895, si las combinaciones de urano, que se tornan sumamente fluorescentes si son excitadas por rayos catódicos, emitían, después de ese bombardeo, rayos de Roentgen.

Placas fotográficas protegidas de la acción de la luz visible por una envoltura de papel absorbente, situadas en la proximidad de esos compuestos, acusaron al ser reveladas, un ennegrecimiento. Becquerel no tardó en comprobar, en el año 1896, que tal hecho se observaba aún cuando aquella substancia no hubiese sido excitada previamente por el bombardeo catódico; que los ravos emitidos provenían, simplemente, del urano, sin que fuese necesario ni la acción de otros rayos ni de influencia térmicas o eléctricas, por lo cual los denominó rayos del urano. Descubrió, además, que estos ravos penetrantes no sólo ennegrecían las placas sino que excitaban la fluorescencia v hacían conductor al aire. Este último fenómeno se hace ostensible en el hecho de que un electroscopio se descarga con mayor rapidez que la ordinaria si en su inmediata proximidad se encuentra una sal de urano.

Una medida de la intensidad de la ionización del aire y por consiguiente de la intensidad de la radiación del compuesto estará, pues, dada por la velocidad de la descarga de un electroscopio o de un electrómetro. Usando el lenguaje definitivo diremos que los compuestos de urano son radioactivos.

2. Los trabajos de los esposos Curie. — I. Los métodos Eléctricos. — Los esposos Curie emplearon un electroscopio semejante al que indica esquemáticamente la fig. 316. La hojuela H está suspendida en una barra metálica B a la cual va unida rígidamente otra barra transversal que termina de un lado en una esferilla C y del otro en una placa circular P. Este sistema queda aislado mediante una pieza A de ámbar, que está fija en la cara superior de la caja metálica M. Frente y paralelamente a P se



encuentra otra placa P que está rígidamente unida a M. Mediante piezas metálicas adicionales, que están representadas por líneas de puntos en la figura, el sistema aislado queda dentro de un recinto metálico que se lleva a potencial cero conectándolo con tierra. La substancia radioactiva se sitúa sobre la placa P. El sistema se carga a potencial adecuado mediante la esfera C. Los iones que engendra en el aire situado entre P y P la radiación de la substancia activa son arrastradas por la fuerza eléctrica allí reinante y el electroscopio se descarga.

El movimiento de la hojuela se observa con un microscopio por el agujero M. Si se supone constante la capacidad del sistema aislado, el desplazamiento de la hojuela sobre la escala micrométrica en una unidad de tiempo es directamente proporcional a la corriente de ionización entre P y P' y por lo tanto a la intensidad de la radiación emitida por la substancia activa.

II. El descubrimiento del polonio y del pádium. — Con el método eléctrico que hemos señalado más arriba, madame Curie comprobó que la intensidad de la radiación de las sales de urano no dependía del compuesto sino exclusivamente del contenido de urano, siendo proporcional a la cantidad de esta substancia. La radioactividad resultó ser, por lo tanto, una propiedad no del compuesto sino del átomo del urano.

Investigaciones posteriores llevadas a cabo por madame Curie, con minerales de aquel cuerpo, le revelaron que en ellos la intensidad de la radiación era superior a la que correspondía a su contenido en urano. Ella y su esposo atribuyeron ese hecho a la presencia de algún o algunos elementos radioactivos, hacia cuya búsqueda orientaron sus experimentos.

Por los procedimientos analíticos produjeron todas las separaciones químicamente posibles y analizaron eléctricamente la radioactividad de los cuerpos obtenidos. Así descubrieron, en el año 1898, una substancia químicamente semejante al bismuto pero que se distinguía de éste por su radioactividad que era mil veces mayor que la del urano. A ese metal le dieron el nombre de polonio. Seis meses más tarde descubrieron que en Bario obtenido en el curso de aquellas separaciones se concentraba granparte de la radioactividad del mineral. Por procedimientos químicos no les fué posible, en modo alguno, separar del bario el elemento radioactivo, por lo que recurrieron al

método físico-químico de separación que se funda en la cristalización fraccionada de las sales, logrando así productos que eran un millón de veces más radioactivos que los del urano.

Como esa actividad no pudo ser luego aumentada por ningún procedimiento, adquirieron la certidumbre, comprobada después por ulteriores trabajos, de que habían hallado una sal químicamente pura de un nuevo elemento, al cual dieron el nombre de rádium.

El mineral de urano más rico en rádium es la pechblenda de Joachimstal Bohemia. La concentración es, sin embargo, tan pequeña que para obtener un gramo de aquel metal es necesario operar con 7.000 kg. de aquella materia prima, supuesto el caso ideal de que las pérdidas fuesen nulas.

En cada gramo de pechblenda habría, pues, en término medio, 1/7.000 mg. de rádium. Las mayores concentraciones que se conocen no alcanzan a 3/10.000 mg. por gramo. Pero es de advertir que el método eléctrico que hemos indicado más arriba permite develar la presencia de 1/100.000 mg. de rádium.

Posteriormente, en el año 1910, madame Curie y A. Debierne obtuvieron rádium metálico, por electrólisis de

una solución de cloruro de ese metal.

Las propiedades químicas de ese elemento son muy semejantes a las del bario, lo cual explica porqué no fué posible separarlos mediante ninguna reacción. Su peso atómico es, según O. Honig Schmid, 225,97.

En el año 1898, madame Curie y G. C. Schmid descubrieron que el conocido metal thorium era radioactivo. Las mechas para gas, cuya composición es, en un 99 %, de óxido de thorium permiten comprobar en el laboratorio lo que terminamos de decir. Si se acerca una de ellas a un electroscopio cargado, éste se descarga rápidamente.

El *urano* y el *thorio* son los padres de todos los cuerpos radioactivos que se conocen, exceptuando el potasio y el rubidio cuya actividad es muy pequeña.

El aktinium, descubierto por Debierne, y en realidad también por F. Giesel, y que da lugar a toda una familia de cuerpos radioactivos no es sino una rama que arranca también del urano.

3. Examen de la radiación de las substancias radioactivas. Partículas α y β y rayos γ . — Acabamos de afirmar que el urano y el thorio son los padres de todos los cuerpos radioactivos. El estudio de los fenómenos que se producen en estos cuerpos enseña que ellos se transforman, sucesivamente, en otros de diferentes propiedades por la emisión de partículas cargadas de electricidad positiva: los α , de electrones negativos β y de una ondulación electromagnética, los rayos γ , que no son sino rayos X de gran dureza. La emisión de estos rayos constituye un proceso accesorio que acompaña a la de los otros corpúsculos, en particular a la de los β .

Cuando la transmutación del átomo es originada por la emisión de una partícula α , se dice simplemente: transformación α . Análogamente se dice, en el otro caso, transformación β .

El esquema que sigue y la explicación de que va acompañado a continuación ilustran lo suficiente lo que acabamos de decir.

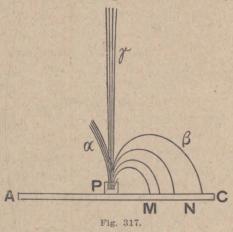
Urano
$$I \rightarrow \alpha \rightarrow \text{Urano } X_1 \rightarrow \beta \rightarrow \text{Urano } X_2 \rightarrow \beta \gamma \rightarrow \text{Urano } II$$
238,14
234
234
234

$$\rightarrow \alpha \rightarrow \text{Ionium} \rightarrow \alpha \rightarrow \text{Rádium} \rightarrow \alpha \beta \gamma \rightarrow \text{Emanación} \rightarrow \alpha$$
, etc. 230 226 222

El urano, cuyo peso atómico es 238,14, por emisión de partículas α se convierte en el urano X_1 , cuyo peso atómico es de 234; éste, por emisión de partículas β , en urano X_2 del mismo

BIBLIOTECA NACIONAL DE MAESTROS peso atómico que el anterior; el urano X_2 por emisión de partículas β y rayos γ en urano II, que por emisión α se convierte en ionio de peso atómico 230; el ionio por emisión de partículas α , da el rádium, el cual por emisión de partículas α y electrones β origina el gas emanación. Este proceso sigue, rematando en un cuerpo final estable: el plomo. Lo análogo se observa en el caso de las familias que arrancan del actinio y del thorio; la materia final es también el plomo.

El signo de la carga de las partículas α y β y la naturaleza electromagnética de los rayos γ , han sido revelados



por la acción del campo magnético. La fig. 317, que es la clásica de los esposos Curie, enseña que en un campo magnético, cuyas líneas de fuerza normales al plano del papel tuviesen el sentido que va de arriba hacia abajo, las partículas β, procedentes de un preparado de rádium contenido en

la cápsula P de plomo, son desviadas hacia la derecha, las α sufren una pequeña desviación hacia la izquierda, mientras que los rayos γ no experimentan desviación alguna.

La instalación de la fig. 317 es, en verdad, la que permite comprobar la presencia de las partículas con cargas negativas β . La pantalla AC es fluorescente. Al actuar la fuerza magnética en el sentido indicado se advierte la fluorescencia en la zona MN, a la derecha, o si se cambia el sentido del campo magnético la fluorescencia pasa a una

zona de la izquierda; si se tapa el preparado con una lámina de plomo de 1 mm. de espesor la fluorescencia desaparece. Con otra pantallita fluorescente es posible revelar la presencia de partículas desviadas en el sentido que corresponde a partículas positivas, es decir de las partículas α . Puesto que se comprueba por la acción sobre un elestroscopio cargado y sobre una placa fotográfica la existencia de rayos que no son desviados, se sigue que son realmente rayos en el sentido óptico y no partículas. Son, como ya hemos dicho, los rayos γ .

I. Partículas β . — Estas partículas no son sino rayos catódicos de gran velocidad, es decir electrones negativos. En el proceso de transformación de una substancia en otra por emisión de partículas β , el átomo, al transmutarse, emite del núcleo una sola partícula β . La experiencia enseña, que las partículas β no son emitidas en un proceso dado con una sola velocidad, sino que aparecen diversas velocidades bien definidas, por lo que se habla de "un espectro de líneas de rayos β ". Este hecho se debe, en parte, a que los rayos γ , que se producen como fenómeno accesorio, arrancan, fotoeléctricamente, electrones de los diversos pisos del átomo.

II. Partículas α. — Estas partículas son átomos del gas helio doblemente ionizados positivamente, o, para hablar con toda propiedad, son átomos de helio sin sus dos electrones planetarios (¹). Así se explica su doble carga positiva.

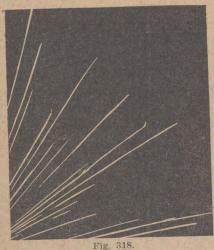
Que las partículas α se convierten en helio ha sido comprobado por Rutherford y Royds, en el año 1900, encerrando rádium (²) en un tubo de vidrio de paredes sumamente delgadas, a través de las cuales no podían pasar los átomos de helio pero sí las partículas α . Situado ese tubo en el

 ⁽¹⁾ El átomo del helio está constituído por un núcleo con dos cargas elementales de electricidad positiva y de dos electrones negativos que giran a su derredor.
 (2) Ellos encerraron, en realidad, emanación.

interior de un tubo de Geissler, en el cual se hizo el vacio, se comprobó, espectroscópicamente, la presencia de helio en este último, transcurridos cuatro días.

La experiencia enseña que toda substancia radioactiva que se transforma emitiendo partículas α, emite a éstas con una velocidad fija, lo que contrasta con lo que sucede con las β. Este hecho es debido a que las partículas α provienen exclusivamente, del núcleo.

La experiencia enseña que del átomo sale por vez una sola partícula α . Las velocidades de las partículas α de



los diferentes cuerpos radioactivos están comprendidas entre 1,45.109 y 2,22.109 cm/seg. y la energía correspondiente a una sola particula entre 0,645.10⁻⁵ y 1,35.10⁻⁵ erg.

Las partículas que emite una substancia radioactiva sólo pueden atravesar un espesor definido de una substancia dada. Si se investiga cómo disminuye la intensidad de los efectos que producen las partículas α

con la distancia, se advierte un hecho curioso: que todas las señales de ionización y escintilación desaparecen, bruscamente, a partir de cierta distancia a la cual se le llama alcance. El alcance en aire de las partículas a de diversos cuerpos a 760 mm. de presión y a 15° C, está comprendido entre 2,5 y 8,6 cm.

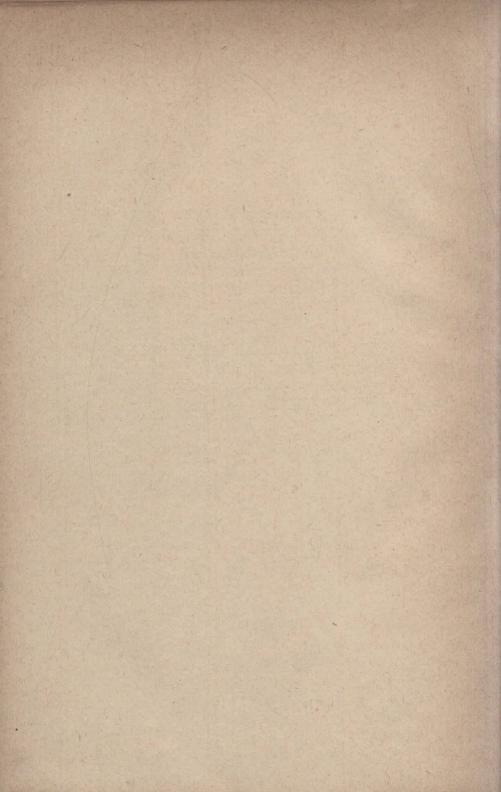
Rutherford y Geiger, en el año 1908, y posteriormente otros investigadores han determinado el número de partículas α que emite un gramo de rádium en un segundo. Resulta

$N = 3,7.10^{10}$.

Se pueden obtener fotográficamente las huellas de las partículas α y, en general de cualquier corpúsculo cargado, mediante el procedimiento de Wilson. Este hace que las partículas se muevan en una cámara saturada de vapor de agua. La presencia de una de ellas en un lugar se revela por el hecho de que los iones que allí forman por choque originan una condensación local del vapor, formándose una pequeñísima gota de rocío, que aparece, bien iluminada, bajo el aspecto de un punto brillante. La sucesión de esos puntos hace visible la trayectoria.

La fig. 318 es la fotografía de las trayectorias de partículas α . Se observa, que al fin de la marcha, cuando la velocidad es muy pequeña, aparecen, a veces, desviaciones repentinas muy pronunciadas.

Eso sucede cundo la partícula hace impacto con el núcleo del átomo.



INDICE

	Págin
CAPÍTULO I. — MOVIMIENTO OSCILATORIO. EL SONIDO. — Movimiento oscilatorio. Amplitud, período y frecuencia. — Naturaleza del sonido. — Los tres caracteres del sonido. — A. Intensidad. — B. Altura. — C. Timbre. — Límites de los sonidos perceptibles)
CAPÍTULO II. — PROPAGACIÓN DEL MOVIMIENTO OSCILATORIO. ONDAS. — Generalidades. — Ondas longitudinales y transversales. — Otros caracteres del movimiento: longitud de onda. — Las ondas superficiales de los líquidos. — Superposición de ondas. — Propagación del sonido. Velocidad de propagación en distintos medios. — A. Velocidad en el agua. — C. Velocidad en los sólidos. — Reflexión del sonido. Eco. — Refracción del sonido	
CAPÍTULO III. — ONDAS ESTACIONARIAS. — Vibraciones de las cuerdas. — Vibraciones longitudinales de las barras. — Vibraciones transversales de las barras. Diapasón. — Vibraciones de los tubos. — A. Extremo superior cerrado. — B. Extremo superior abierto. — Resonancia. Nociones de acústica musical. Acordes. Consonancia y disonancia. Intervalos musicales. — Sostenidos y bemoles. Gama temperada	27
CAPITULO IV. — PROPAGACIÓN DE LA LUZ. INTENSIDAD DE ILUMINA- CIÓN Y LUMINOSA. — Propagación rectilínea de la luz. — Velocidad de propagación. — I. El método de Roemer. — II. Método de Fizeau. — Intens'dad de iluminación e intensidad luminosa. — Iluminación en fun- ción de la distancia y del ángulo. — Fotómetro de Bunsen. — Unidades	41
CAPÍTULO V. — REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ. — A. Reflexión. — Espejos planos. — Generalidades. — Leyes de la reflexión. — Espejos planos. — B. Espejos esféricos. — Generalidades. — Espejos cóncavos. — I. Foco principal. — II. Formación de imágenes. — III. Fórmula de los focos conjugados. — IV. Espejos convexos. — C. Refracción de la luz. — Las leyes de la refracción. — Algunos fenómenos debidos a la refracción. — Relación entre las velocidades de propagación y los índices de refracción. — Reflexión total. — Experimentos. — Prisma de reflexión total. — Espejismo. — Lámina de caras paralelas. — Refracción en el Fórmula del prisma. — A. Marcha de los rayos. Ángulo de desviación mínima. — B.	53
CAPÍTULO VI. — LENTES E INSTRUMENTOS ÓPTICOS, — A. Lentes. Lentes delgadas. — Definición. Marcha de un rayo de luz a través de una lente. — Lentes delgadas. — I. Definición. Cuándo a un punto objeto corresponde un punto objeto imagen. — II. Foco. — III. Centro óptico. — IV. Distancia focal. — V. Formación de imágenes. — VI. Fórmula de los focos conjugados. — B. El ojo. — El ojo desde el punto de vista óptico. — I. Descripción. — II. Como se comporta ópticamente. — III. Ojo miope e hipermétrope. — IV. Poder separador. — V. La sensación de relieve. — C. Instrumentos ópticos. — Lente de aumento. — Microscopio compuesto. — Anteojos astronómico y terrestre. — Máquina fotográfica	
CAPITULO VII. — DISPERSIÓN DE LA LUZ. — Dispersión de la luz por el prisma. — Recomposición de la luz. — Colores complementarios. — Espectros de emisión y de absorción. — I. El espectroscopio. Espectrógrafos. — II. Forma de excitación de los cuerpos. — III. Espectro de los cuerpos sólidos ingandescente.	73
recidos. — V. Espectros de absorción. — VI. Análisis espectral	89

- Capítulo X.— ELECTROSTÁTICA. A. Hechos fundamentales. Electrización por frotamiento. Las dos electricidades. Acciones recíprocas. El electroscopio. Conductores y a'sladores. Equivalencia de las dos cantidades de electricidad producidas por roce. Sobre la naturaleza de la electricidad. Máquina electrostática a frotamiento. Influencia eléctrica. Distribución de la electricidad en la superficie de los conductores. Densidad eléctrica. Acción de las puntas. Relación entre las cargas inductoras e inducidas. Caja de Faraday. El electróforo de Volta. La máquina de Wimshurst. Advertencia importante. B. La ley de Coulomb. El campo eléctrico. El potencial. La ley de Coulomb. Unidad electrostática CGS. Unidad práctica: Coulomb. Campo eléctrico. Su intensidad. Líneas de fuerza. El potencial. II. Idea experimental. II. Definición precisa del potencial. III. El potencial de un conductor con cargas eléctricas en equilibrio tiene el mismo valor en toda su superficie. Unidad electrostática y práctica de diferencia de potencial. Principio del electrómetro absoluto de Lord Kelvin. Ejercicios. C. Capacidad. Condensadores. Energía de un conductor cargado. Capacidad de un conductor. I. Definición. II, Unidades de capacidad. III. La capacidad de una esfera. Variación de la capacidad de un conductor is se le acerca otro a potencial cero. Principio de los condensadores. La botella de Leyden. Ejercicios. Energía de un conductor cargado y de un condensador. I. Su expresión. II. Prueba. III. Otras formas de expresión. IV. Energía de un condensador. Dieléctricos. La constante dieléctrica
- - Capítulo XII. ENERGÍA DE LA CORRIENTE. Trabajo de las fuerzas eléctricas en la corriente eléctrica. — Ley de Joule. — Experimentos. — Corto circuito. — Fusibles. — Aplicaciones. — I. Planchas. Calentadores.

	Página
Lámparas a filamento incandescente. — II. Arco voltaico. — III. Solda dura. — Otra aplicación. Instrumentos de medida a hilo caliente. — Ejer cicios.	195
CAPÍTULO XIII. — ELECTRÓLISIS. — Generalidades. — Electrólisis de sulfate de cobre. — I lectrólisis del agua. — Las leyes de Faraday. — Medición de la intensidad de una corriente mediante la electrólisis. Voltámetro de plata. — Teoría de la electrólisis. Iones. — Aplicaciones de la electrólisis — Polarización. — Acumuladores.	
CAPÍTULO XIV. — EL CAMPO MAGNÉTICO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA APLICACIONES. — Campo magnético de una corriente rectilinea. — I Forma de las líneas de fuerza. — II. La ley de Biot y Savart. — Campo magnético de una corriente circular. — La unidad electromagnética de intensidad de corriente o Weber y el Ampère. — Campo magnético de un solenoide. — El electroimán. — Campanilla eléctrica. — El telégrafo	
Capítulo XV. — LAS FUERZAS PONDEROMOTRICES. — Acción de un campo magnético sobre una corriente. — Experimentos de curso, La rueda de Barlow. — Acciones entre las corrientes. — El motor eléctrico. — Principio de los galvanómetros.	
Carítulo XVI. — LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. — Los hechos fundamentales. — I. Generalidades. — II. Inducción por movimiento de imanes permanente, — III. Inducción por desplazamiento de un conductor por el cual fluye una corriente eléctrica. — IV. Inducción por desaparición, aparición, aumento o disminución del campo magnético. — V. Inducción por desplazamiento del conductor o parte del mismo en el campo magnético. — La ley de la inducción electromagnética de Faraday. — I. Definición de flujo. — II. La ley de Faraday. — La regla de Lenz. — Inducción mutua. — Autoinducción. Sus fenómenos. — Las corrientes de Foucault. — Bobina o inductor de Ruhmkorff. — Interruptores. — El anillo de Gramme. — Nociones sobre corriente alternada. — I. Producción. — II. Tensión e intensidad eficaz de una corriente alterna. — III. Impedancia. — IV. Influencia de una capacidad	
CAPÍTULO XVII. — OSCILACIONES ELÉCTRICAS. — Descarga oscilatoria de un condensador. — Un experimento de curso. — Resonancia eléctrica: experimento de Lodge. — Ondas hertzianas. — I. Generalidades. — II. Los fenómenos de resonancia con osciladores abiertos. — III. Ondas electromagnéticas estacionar as. — El oscilador lineal. — El campo electromagnético de un oscilador lineal. — Telefonía y telegrafía sin hilos. — A. Los experimentos de Marconi. La excitación de Braun. — B. Los detectores a cristal	265
CAPÍTULO XVIII. — ATOMISMO DE LA ELECTRICIDAD. — Descarga a través de los gases enrarecidos. Tubos de Plücker. Rayos catódicos, canales y rayos X. — Descarga a través de los gases enrarecidos. Tubos de Plücker. — Los rayos catódicos. — Los dos grandores fundamentales de las partículas catódicas. — A. Generalidades. — B. Aplicaciones del terema de la energía cinética. — C. Caída en un campo eléctrico homogéneo. — Reseña histórica. — Los rayos canales o rayos positivos — Los rayos X.	279
CAPÍTULO XIX. — RADIOACTIVIDAD. — Las observaciones de Becquerel. — Los trabajos de los esposos Curie. — I. Los métodos eléctricos. — II. El descubrimiento del polonio y del rádium. — Examen de la radiación de las substancias radioactivas. Partículas a y B y rayos a I. December 1.	
las β. — II. Partículas α	297

Este libro se terminó de imprimir el 11 de Marzo de 1940, en los Talleres Gráficos de la "Editocial Estrada". — Bolívar 466. — Bs. As.

